



Universidad  
Carlos III de Madrid

**Trabajo Fin de Grado**

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Mecánica

Ingeniería en Tecnologías Industriales

**ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE  
FISURAS EN EJES/VIGAS MEDIANTE  
EL ESTUDIO DE LA AMPLITUD DE  
LAS SEÑALES DE TENSIÓN**

**Autor:** Carlos Javier Sánchez Escobar

**Tutora:** M<sup>a</sup> Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre

Leganés, 9 de Octubre 2014



# Agradecimientos

Tras cuatro años en la Universidad, por fin cierro una etapa en mi vida, una etapa que me ha traído innumerables alegrías e incontables frustraciones. No obstante, tanto en lo bueno como en lo malo, nunca realicé sólo este camino, sino que fui madurando, tanto profesional como personalmente, de la mano de muchísimas personas que nunca desistieron en su empeño de que conseguiría algún día finalizar esta carrera.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora Lourdes, a quién no solo le debo que me brindase la oportunidad de realizar este proyecto junto a ella, sino también toda su dedicación y paciencia que tuvo conmigo durante la realización del mismo

Por supuesto no me puedo olvidar de mis padres, Santiago y Mercedes, de quienes siempre he recibido palabras de ánimo y motivación para conseguir que algún día llegase a ser un gran profesional.

También quiero acordarme de mi hermano, Juan Luis, por su consuelo y aliento en los momentos más difíciles.

Y por último, quiero acordarme de mis amigos, por esos momentos de relajación, diversión, paz y tranquilidad que me han ayudado a equilibrar mi vida durante estos cuatro últimos años.

# Resumen

Todos los componentes mecánicos y estructurales a lo largo de su vida en servicio son susceptibles de presentar fallos, ya que las condiciones reales de funcionamiento o de fabricación pueden llegar a discrepar de las que esperaba en un principio el diseñador. En la mayoría de los casos estos fallos se inician debido a la presencia de fisuras en el interior de dichos elementos, pudiendo provenir de defectos del material, de errores durante el proceso de fabricación o incluso habiendo sido inducidas durante el servicio. Debido a los enormes perjuicios que puede suponer el fallo de estos componentes, ya no sólo en el ámbito económico (tales como las generadas por la falta de integridad estructural del componente o las producidas por la demora en la producción de un nuevo componente) sino también en el social (pudiendo ocasionar daños tanto a las vidas humanas como al medio ambiente), han provocado que a lo largo de los últimos años se hayan desarrollado multitud de métodos no destructivos con el fin de detectar e identificar defectos en los componentes sin poner en peligro la integridad del mismo, cobrando especial importancia aquellos que involucran la simulación numérica.

En el presente informe se pretende desarrollar un método innovador que permite detectar y estudiar las fisuras existentes en una viga con un comportamiento a flexión, mediante el análisis y el tratamiento de ondas propagándose en el interior de una viga fisurada. Para ello se empleará la herramienta informática de elementos finitos Abaqus, con la cual se obtendrán las relaciones existentes entre algunas de las propiedades de la onda y las características de la fisura, tales como la localización y el tamaño, las cuales permitirán determinar si el componente estudiado presenta o no defectos.

Este método de simulación numérica presenta la ventaja de que puede emplearse en cualquier componente, ya sea viga o eje, sin necesidad de conocer previamente las características del material que conforma el componente, ni el comportamiento del eje intacto (sin fisuras)

**Palabras clave:** ondas, fisuras de frente recto, método de elementos finitos.

# Abstract

All mechanical and structural components are likely to present damage during their lifetime, due to operating conditions that differ from the conditions initially thought by the designer. The cause of this is that real operating conditions can differ from the conditions that the designer initially thought. Mostly these mistakes occur as a consequence of the presence of cracks inside these components. Errors during the manufacturing process or alterations while being used can be the origin of these cracks. Failures in these mechanical and structural components could imply terrible consequences: both in the economic field (delay in the production of new components and lack of structural integrity) and the social field (possibility of damage lives and environment). To prevent it, in the last years new nondestructive methods, which do not compromise the integrity of the components, have been developed to detect and identify defects in these components. Special importance has the nondestructive methods based on numerical simulation.

This review pretends to design a new method that allows the detection and study of cracks in a beam with a behavior to flexion. This technique is based on the analysis and treatment of waves propagation inside a cracked beam. Abaqus computer tool for finite elements will be used to assemble it. Abaqus allows us to know the relation between different characteristics of the wave, as the area and the amplitude, the crack distinctiveness (localization and size, for example). The analysis of all these characteristics will determine if the studied component has or not structural or functional defects.

The advantage of using the numerical simulation based on method is that it can be used in any components of constant section, like a beam or axis, without the need of previously knowing material composition and the behavior of the intact component (with no cracks).

**Keywords:** waves, rectal front fissures, finite elements methods



# Índice General

<b>1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	3
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
2.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	6
2.1.1 INTRODUCCIÓN A LOS END .....	6
2.1.2 TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS MÁS USUALES. VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	7
2.1.2.1 Técnicas de Inspección Superficial .....	7
2.1.2.1.1 Inspección Visual .....	8
2.1.2.1.2 Líquidos Penetrantes.....	8
2.1.2.1.3 Partículas Magnéticas .....	9
2.1.2.1.4 Electromagnetismo (corrientes de Eddy) .....	10
2.1.2.2 Técnicas de Inspección Volumétrica .....	11
2.1.2.2.1 Radiografía industrial .....	11
2.1.2.2.2 Ultrasonido industrial .....	11
2.2 ONDAS LONGITUDINALES .....	12
2.2.1 INTRODUCCIÓN A LAS ONDAS ELÁSTICAS .....	12
2.2.2 BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ONDAS LONGITUDINALES .....	13
2.2.3 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS LONGITUDINALES .....	14
2.3 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	17
2.3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	17
2.3.2 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA ABAQUS 6.11-2 .....	18
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>21</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO .....	22
3.2 METODOLOGÍA .....	23
3.2.1 MÉTODO DIRECTO.....	24
3.2.2 MÉTODO INVERSO.....	25
3.3 CARACTERÍSTICAS DE LA VIGA .....	27
3.4 CARACTERÍSTICAS DE LA FISURA .....	29
3.5 PROGRAMACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MEDIANTE LENGUAJE PYTHON .....	30
3.6 MODELO NUMÉRICO .....	34
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>43</b>



<b>4.1 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 MÉTODO DIRECTO .....</b>	<b>45</b>
4.2.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	45
<b>4.3 MÉTODO INVERSO.....</b>	<b>51</b>
4.3.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
<b>4.4 INFLUENCIA DE LA SOLICITACIÓN A FLEXIÓN.....</b>	<b>55</b>
<b><u>5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u></b>	<b><u>63</u></b>
5.1 CONCLUSIONES .....	64
5.2 LIMITACIONES .....	65
5.3 TRABAJOS FUTUROS.....	67
<b><u>6. GESTIÓN DEL PROYECTO</u></b>	<b><u>69</u></b>
6.1 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	70
6.1.1 PLANIFICACIÓN INICIAL .....	70
6.1.2 PLANIFICACIÓN FINAL .....	71
6.2 PRESUPUESTO.....	73
6.2.1 COSTE DEL PERSONAL.....	73
6.2.2 COSTES DE MATERIAL .....	74
6.2.3 COSTES INDIRECTOS .....	75
6.2.4 COSTE TOTAL DEL PROYECTO .....	75
<b><u>7. BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b><u>77</u></b>

# Índice de figuras

<b>Figura 2.1:</b> Ensayo con líquidos penetrantes.....	9
<b>Figura 2.2:</b> Ensayo con partículas magnéticas. ....	9
<b>Figura 2.3:</b> Ensayo con corrientes inducidas.....	10
<b>Figura 2.4:</b> Ensayo por radiografía industrial.....	11
<b>Figura 2.5:</b> Ensayo por ultrasonidos.....	12
<b>Figura 2.6:</b> Onda longitudinal. ....	13
<b>Figura 2.7:</b> Elemento diferencial de un componente mecánico sin deformar.....	14
<b>Figura 2.8:</b> Deformacion del componenente mecánico.....	14
<b>Figura 2.9:</b> Fuerzas actuantes sobre un elemento deformado .....	15
<b>Figura 3.1:</b> Propagación de la onda por una viga intacta .....	22
<b>Figura 3.2:</b> Propagación de la onda por una viga con fisura .....	23
<b>Figura 3.3:</b> Viga solicitada sometida a fisura .....	23
<b>Figura 3.4:</b> Propiedades de la onda .....	24
<b>Figura 3.5:</b> Onda de tensión .....	25
<b>Figura 3.6:</b> Detalle de la posición del sensor y la fisura en la viga .....	25
<b>Figura 3.7:</b> Viga solicitada sometida a fisura .....	27
<b>Figura 3.8:</b> Viga biapoyada y con cargas .....	27
<b>Figura 3.9:</b> Esquema del ensayo y detalle de la seccion fisurada .....	28
<b>Figura 3.10:</b> Tipos de fisuras.....	29
<b>Figura 3.11:</b> Geometria transversal de la fisura .....	29
<b>Figura 3.12:</b> Fragmento del código en Phyton. Asignación de las variables .....	31
<b>Figura 3.13:</b> Fragmento del código en Phyton. Creación de las partes y material .....	32
<b>Figura 3.14:</b> Fragmento del código en Phyton. Ensamblaje de la viga.....	32
<b>Figura 3.15:</b> Fragmento del codigo en Phyton. Creacion del tipo de analisis e interaccion para $\alpha = 0.5$ .....	33
<b>Figura 3.16:</b> Fragmento del codigo en Phyton. Mallado y lanzamiento del caso... ..	33
<b>Figura 3.17:</b> Modelado de una parte de la viga de estudio.....	34
<b>Figura 3.18:</b> Geometria de la viga en Abaqus.....	35
<b>Figura 3.19:</b> Detalle de las particiones para $\beta = 0$ .....	35
<b>Figura 3.20:</b> Particiones de la viga .....	36
<b>Figura 3.21:</b> Comparativa coste computacional.....	37
<b>Figura 3.22:</b> Definición del análisis realizado.....	37
<b>Figura 3.23:</b> Área fisurada para $\alpha = 0.1$ .....	38

<b>Figura 3.24:</b> Cargas puntuales aplicadas .....	39
<b>Figura 3.25:</b> Sentido de la carga aplicada .....	39
<b>Figura 3.26:</b> Curva de la presión aplicada.....	40
<b>Figura 3.27:</b> Viga con apoyos. ....	40
<b>Figura 3.28:</b> Detalle de los apoyos de la viga .....	41
<b>Figura 3.29:</b> Mallado de la viga. ....	41
<b>Figura 4.1:</b> Visualización de la fisura abierta.....	44
<b>Figura 4.2:</b> Visualización de la onda longitudinal.....	45
<b>Figura 4.3:</b> Señales recogidas para diferentes fisuras por el método directo .....	46
<b>Figura 4.4:</b> Señales desplazadas para diferentes fisuras.....	47
<b>Figura 4.5:</b> Detalle de las ondas reflejadas en la sección fisurada .....	48
<b>Figura 4.6:</b> Obtención de propiedades de las ondas .....	49
<b>Figura 4.7:</b> Amplitud en función de la profundidad de la fisura. ....	50
<b>Figura 4.8:</b> Área bajo la curva en función de la profundidad de la fisura. ....	50
<b>Figura 4.9:</b> Representación onda general aleatoria. Método inverso. ....	52
<b>Figura 4.10:</b> Procedimiento de obtención de $\alpha$ por el criterio de las áreas.....	53
<b>Figura 4.11:</b> Procedimiento de obtención de $\alpha$ por el criterio de las amplitudes .....	54
<b>Figura 4.12:</b> Comparación para una longitud característica de $\alpha = 0.5$ .....	55
<b>Figura 4.13:</b> Comparación para una longitud característica de $\alpha = 0.4$ .....	56
<b>Figura 4.14:</b> Comparación para una longitud característica de $\alpha = 0.3$ . ....	56
<b>Figura 4.15:</b> Detalle de la comparacion de las ondas de traccion para $\alpha = 0.5$ .....	57
<b>Figura 4.16:</b> Detalle de la comparación de las ondas de tracción para $\alpha = 0.4$ .....	58
<b>Figura 4.17:</b> Detalle de la comparación de las ondas de tracción para $\alpha = 0.3$ .....	59
<b>Figura 4.18:</b> Comparación de las amplitudes entre una viga solicitada y otra sin solicitar .....	60
<b>Figura 4.19:</b> Comparación de las áreas encerradas entre una viga solicitada y otra sin solicitar. ....	60
<b>Figura 4.20:</b> Diferencias entre las longitudes características para una viga solicitada y otra sin solicitar .....	61
<b>Figura 5.1:</b> Fisura situada entre el punto aplicación presión y sensor.....	65
<b>Figura 5.2:</b> Viga fisurada con doble sensor.....	66
<b>Figura 5.3:</b> Viga de sección variable.....	67
<b>Figura 6.1:</b> Planificación inicial. Diagrama de Gantt.....	70
<b>Figura 6.2:</b> Planificación final. Diagrama de Gantt.....	71





# Índice de tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Clasificación de los END según el fenómeno físico .....	7
<b>Tabla 2.2:</b> Clasificación de los END según la posición de la discontinuidad. ....	7
<b>Tabla 3.1:</b> Propiedades del material de la viga.....	36
<b>Tabla 3.2:</b> Amplitud de la carga aplicada. ....	39
<b>Tabla 4.1:</b> Valores de las propiedades de la onda en función de la fisura.....	49
<b>Tabla 4.2:</b> Valores de las propiedades de la onda en función de la sollicitación para $\alpha = 0.5$ .....	57
<b>Tabla 4.3:</b> Valores de las propiedades de la onda en función de la sollicitación para $\alpha = 0.4$ . ....	58
<b>Tabla 4.4:</b> Valores de las propiedades de la onda en función de la sollicitación para $\alpha = 0.3$ .....	59
<b>Tabla 6.1:</b> Planificación final detallada. ....	73
<b>Tabla 6.2:</b> Costes asociados al personal .....	74
<b>Tabla 6.3:</b> Coste de los materiales empleados en el proyecto .....	74
<b>Tabla 6.4:</b> Coste total del proyecto.....	75

# Nomenclatura

$\alpha$	Longitud característica de la fisura.
$\beta$	Factor de forma de la fisura.
$c$	Velocidad de propagación.
$E$	Módulo de Elasticidad o módulo de Young.
$\rho$	Densidad del material.
$\nu$	Coeficiente de Poisson del material.
$a$	Profundidad de la fisura, semieje menor de la elipse
$h$	Altura de la sección transversal.
$c$	Coordenada horizontal del punto exterior de la viga en el inicio de la fisura.
$d$	Semieje mayor del frente elíptico.
$\sigma$	Esfuerzo normal.
$S$	Sección de la viga.
$\psi$	Desplazamiento longitudinal.
$\varepsilon$	Deformación longitudinal unitaria.
$F$	Fuerza actuante en un elemento diferencial.
$dF$	Fuerza neta actuante sobre un elemento diferencial.



# 1

## Motivación y objetivos

---

*Este capítulo tiene como finalidad detallar los motivos que han llevado a la necesidad de realizar este proyecto, plantear los objetivos que se persiguen y describir la estructura del documento.*

# 1.1 Motivación

La gran mayoría de los componentes mecánicos y estructurales, tales como ejes o vigas, están expuestos a sufrir durante su vida en servicio cualquier tipo de fallo poniendo en riesgo su integridad estructural. Estos fallos suelen venir producidos por la presencia de fisuras y la posterior propagación de las mismas en el interior del componente.

La presencia de fisuras en los elementos mecánicos suele pasar desapercibida, favoreciéndose el crecimiento de las mismas, hasta alcanzar un tamaño crítico que produce la fractura del componente, ocasionando daños catastróficos e irreversibles.

Con el fin de evitar la rotura repentina del componente y, por tanto, minimizar al máximo los costes asociados a su reparación o sustitución, ya durante la revolución industrial se hizo patente la necesaria labor de inspeccionar el comportamiento de los componentes de las máquinas durante su período operativo. No obstante, la complejidad asociada a que las fisuras no siempre aparecen en la superficie de las piezas, hizo imprescindible la búsqueda de técnicas que permitiesen la localización de las fisuras, independientemente del componente inspeccionado y del tipo de fisura del que se trate.

Por este motivo, en el último siglo, se ha motivado el desarrollo de técnicas fiables de detección e identificación de fisuras, con el fin de realizar un mantenimiento predictivo sin necesidad de comprometer la integridad del componente. Estas técnicas no destructivas, fundamentalmente se basan en el estudio del análisis dinámico que presenta el componente cuando está sometido a una fisura, es decir, en el estudio de los cambios que produce la fisura en la rigidez o en las frecuencias naturales de vibración.

Dentro de estas técnicas, en el ámbito ingenieril, han cobrado una relevancia importante los métodos asociados a la simulación numérica, ya que permiten predecir el comportamiento que presenta un componente fisurado sin necesidad de recurrir a la experimentación.

Por ello, en el presente proyecto se pretende analizar numéricamente, mediante el empleo de un programa comercial de elementos finitos, un método de identificación de defectos de forma que se analice la respuesta dinámica de una estructura cuando se inducen por su interior ondas elásticas longitudinales, con el fin de detectar la fisura y cuantificar la magnitud de la misma.

## 1.2 Objetivos

Los objetivos del presente proyecto son los siguientes:

- Desarrollar e implementar una aplicación informática en el lenguaje de programación Phyton que permita automatizar el modelo numérico realizado en Abaqus 6.11 con el fin de analizar y estudiar el comportamiento que presentan las ondas longitudinales por el interior de las vigas fisuradas, y como se relaciona dicho comportamiento con la presencia de la fisura.
- Determinar la influencia e importancia que tiene en los resultados el hecho de someter una viga fisurada a unas cargas puntuales, previas al análisis de simulación numérica.

## 1.3 Estructura del documento

El presente documento se encuentra estructurado en seis capítulos, siendo el primero de ellos en el que se expone la motivación del trabajo realizado y los objetivos que se persiguen en el mismo.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico sobre el que se fundamenta el análisis del presente proyecto. Para ello se realizará en primer lugar una presentación de los ensayos no destructivos, describiendo las técnicas más empleadas en la actualidad, así como las ventajas y las limitaciones que estos presentan, para abordar, seguidamente las características de las ondas longitudinales, realizando una breve explicación de dichas ondas, así como la demostración de la velocidad de propagación que presentan en medios sólidos. El marco teórico concluye presentando el método de elementos finitos así como el software informático Abaqus, que será el encargado de analizar los problemas mediante la aplicación del citado método

En el tercer capítulo, se describe la metodología empleada para la resolución del problema planteado, desarrollando el modo de aplicación de los dos métodos utilizados, (el método directo y el método inverso). Además, también se realiza una descripción detallada de las características de la viga y de la fisura, para finalizar exponiendo la realización del modelado en la herramienta de elementos finitos (MEF) Abaqus, que ha sido realizada gracias a la creación de un script mediante el lenguaje de programación Phyton.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos por los dos métodos empleados (directos e inversos), discutiendo y valorando dichos resultados. El capítulo



se cierra analizando la influencia que presenta la viga solicitada analizada durante el presente proyecto con respecto a otra viga idéntica pero sin sollicitación alguna.

En el capítulo quinto se redactan las conclusiones obtenidas tras la realización de proyecto, y se proponen unas líneas de investigación, tomando como base el presente proyecto.

En el capítulo sexto se representa y describe la gestión realizada para la elaboración del proyecto, distinguiendo entre una planificación inicial y otra final, concluyendo el capítulo, con la elaboración de un presupuesto de los costos asociados a la realización de este proyecto.

Finalmente, el proyecto concluye con las referencias bibliográficas.

# 2

## Introducción

---

*Este capítulo conforma el marco teórico del proyecto en el que se engloban y se exponen los conceptos empleados como base para la realización del proyecto. En él se presentan, en primer lugar, los ensayos no destructivos, exponiéndose una introducción a los ensayos no destructivos, su clasificación y las técnicas más empleadas, describiendo para cada una de ellas las ventajas y las aplicaciones más propicias para su aplicación. Posteriormente, se presentan las ondas que se propagan en los medios deformables o medios elásticos, haciendo especial hincapié en aquellas que provocan que las partículas vibren en la misma dirección que la propagación, es decir, en las ondas longitudinales, deduciendo para estas últimas la ecuación que determina la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, permitiendo al lector conocer, de este modo, la posición de cualquier punto del medio en que se propaga la perturbación en cada instante. Finalmente, el capítulo concluye mediante la descripción del fundamento del método de los elementos finitos, así como la herramienta informática encargada de llevar a cabo el análisis y la simulación del problema propuesto mediante la aplicación del citado método.*

## 2.1 Ensayos no destructivos

### 2.1.1 Introducción a los END

Se denomina ensayo no destructivo (END) a las técnicas que permiten conocer y evaluar el estado de los materiales sin que estos experimenten ningún deterioro en las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales, tanto durante, como una vez finalizado el ensayo.

Mientras que los ensayos destructivos requieren de la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades del elemento o parte del elemento sujeto a inspección, los ensayos no destructivos se fundamentan en la aplicación de métodos físicos indirectos, tales como la transmisión de ondas longitudinales o acústicas, entre otras.

El principal objetivo de este tipo de ensayos reside en la verificación de la homogeneidad y continuidad de los materiales, así como la caracterización de fisuras y grietas, tanto internas como superficiales.

Este tipo de pruebas se suelen llevar a cabo en departamentos de investigación y desarrollo (I+D) con el fin de controlar la calidad y evaluar los defectos de los materiales, tanto durante el proceso de fabricación de los componentes como durante el tiempo en el que se encuentran operativas.

El beneficio económico que presentan con respecto a otros métodos destructivos unido a su utilización en prácticamente cualquier componente han provocado que en el último siglo (sobre todo en 1941 con la fundación de la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos) se desarrollen multitud de técnicas no destructivas enfocadas fundamentalmente a la detección de discontinuidades que pudiesen perjudicar la vida en servicio de los componentes. No obstante, no todos los END son aplicables a cualquier material, sino que dependen de múltiples factores, como por ejemplo la naturaleza del material o el tipo de defecto presente en el mismo. En función de la aplicabilidad de estas técnicas se pueden realizar multitud de clasificaciones, siendo las dos más comunes las que atañen al fenómeno físico en que se basa la técnica (Tabla 2.1) y a la localización de la discontinuidad presente en el elemento a analizar (Tabla 2.2).



Fenómeno Físico	Ensayo no destructivo
Óptica	Inspección Visual, líquidos penetrantes
Electromagnetismo	Radiografía
Acústica	Ultrasonidos
Térmica	Termografía

**Tabla 2.1:** Clasificación de los END según el fenómeno físico [6]

Posición del defecto	Ensayo no destructivo
En la superficie del componente	Inspección visual Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Corrientes inducidas Termografía
En el volumen del componente	Radiografía Ultrasonidos. Emisiones acústicas

**Tabla 2.2:** Clasificación de los END según la posición de la discontinuidad [6]

## 2.1.2 Técnicas No destructivas más usuales.

### Ventajas e Inconvenientes

Como ya se ha expuesto, existen multitud de técnicas no destructivas, y por ende, infinidad de clasificaciones de las mismas. No obstante la clasificación más común, y la que se sigue en el presente informe, se basa en la posición donde se localizan las discontinuidades (Tabla 2.2), pudiendo distinguir entre:

- Técnicas de Inspección Superficial.
- Técnicas de Inspección Volumétrica.

#### 2.1.2.1 Técnicas de Inspección Superficial

Estas pruebas proporcionan información acerca del estado superficial de los materiales inspeccionados y se emplean cuando es preciso detectar discontinuidades que estén en la superficie o a profundidades menores de 3 milímetros. Las técnicas superficiales más comúnmente empleadas son la inspección visual, los líquidos

penetrantes, las partículas magnéticas y el electromagnetismo. Mientras que las dos primeras únicamente son capaces de detectar discontinuidades que se encuentren abiertas a la superficie, las partículas magnéticas y el electromagnetismo permiten la detección de defectos tanto en la superficie como en zonas poco profundas.

### 2.1.2.1.1 Inspección Visual

Es la técnica más básica y frecuente en la detección de fisuras y su empleo suele servir como fase previa para la realización de otros ensayos más sofisticados. Su sencillez, rapidez y economía de aplicación, además de emplear la luz como fenómeno físico (agente que no produce ningún daño a los materiales) han provocado que suela emplearse actualmente como inspección preventiva con el fin de detectar discontinuidades macroscópicas (salpicaduras, grietas,...) que podrían ocasionar en el futuro la rotura catastrófica del componente.

No obstante, aunque es adecuada para todos los materiales, presenta los inconvenientes de que únicamente detecta discontinuidades superficiales y, además, la fiabilidad de la inspección está sujeta a la habilidad del inspector.

### 2.1.2.1.2 Líquidos Penetrantes

El análisis con líquidos penetrantes es un método efectivo para detectar discontinuidades sobre cualquier tipo de material no poroso, tales como roturas, pliegues o inclusiones. Para la realización del ensayo es necesario seguir seis etapas:

1. Limpieza inicial: Antes de comenzar el método, toda la superficie de la pieza o componente debe estar libre de contaminantes que impidan que el líquido penetre en las discontinuidades.

2. Aplicación del líquido penetrante: Sobre toda la superficie previamente limpiada se aplica un penetrante, generalmente de color rojizo que penetrará en las discontinuidades presentes en el material.

3. Limpieza intermedia: Aplicado el penetrante ha de realizarse una segunda limpieza que elimine el exceso de penetrante en la superficie.

4. Revelado: Posteriormente se aplica un líquido revelador con gran poder de absorción, cuya función es absorber el penetrante que ha quedado en el interior de los defectos, quedando por tanto el revelador manchado de rojo en estas zonas.

5. Observación: Una vez que el revelador ha absorbido al líquido penetrante se observan y evalúan los defectos presentes en la superficie del elemento inspeccionado. Esta observación se realiza con luz ultravioleta (luz negra) si el penetrante era

fluorescente (se utiliza si hace falta una alta sensibilidad en la detección de fisuras, como por ejemplo que sean pequeñas o se encuentren cerradas), o luz natural si el penetrante es visible (si la sensibilidad necesaria es menor).

6. Limpieza final: Por último, concluida la inspección se debe limpiar completamente el componente ensayado.

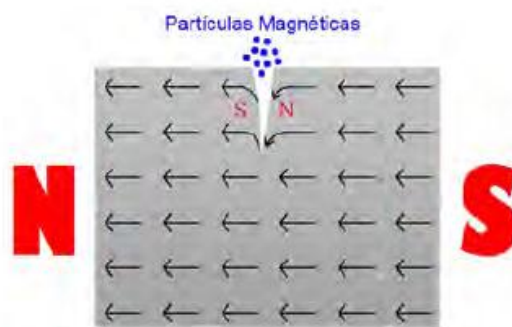


**Figura 2.1:** Ensayo con líquidos penetrantes [6]

Aunque este método al igual que el anterior, sólo es aplicable a defectos superficiales, su uso es muy frecuente debido a que la inspección es muy sensible a las discontinuidades abiertas, muy económico, además de sencillo y rápido de emplear.

### 2.1.2.1.3 Partículas Magnéticas

La técnica de las partículas magnéticas tiene su fundamento en el principio del magnetismo, consistente en la capacidad de atracción existente entre los metales. Para llevar a cabo este método, en primer lugar se induce un campo magnético en un material ferromagnético, para seguidamente espolvorear la superficie de la pieza con partículas de hierro. Las discontinuidades superficiales o sub-superficiales modifican el campo provocando que las partículas se concentren en ellas, como se puede apreciar en la figura 2.2.



**Figura 2.2:** Ensayo con partículas magnéticas [6]

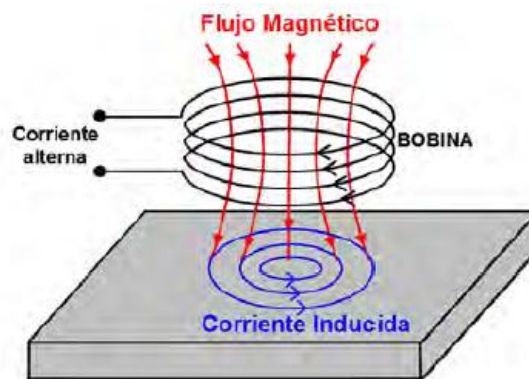
Este ensayo se suele aplicar cuando se requiere una inspección más rápida que los líquidos penetrantes. Sin embargo, tan sólo es capaz de analizar discontinuidades en

materiales ferromagnéticos, y solo detecta las mismas, si se encuentran perpendiculares a las líneas de campo.

#### 2.1.2.1.4 Electromagnetismo (corrientes de Eddy)

La inspección mediante electromagnetismo, anteriormente llamado Corrientes de Eddy o de Foucault, se aplica para inspeccionar discontinuidades superficiales o sub-superficiales en materiales electroconductores. Esta técnica se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética, es decir, se basa en generar corriente eléctrica en un material conductor.

El principio de operación consiste en conectar sobre una bobina de prueba un generador de corriente alterna, produciéndose un campo magnético sobre la misma. Cuando dicha bobina se sitúa cerca de un material conductor, el campo magnético de la misma inducirá una corriente eléctrica sobre el material inspeccionado, provocando a su vez, un campo magnético secundario, proporcional al primero, pero de signo opuesto de manera que contrarreste el campo magnético de la bobina. En caso de que exista alguna discontinuidad en el componente inspeccionado se interrumpirá la corriente inducida (corrientes de Eddy) provocando, de este modo, cambios en el campo magnético inducido, que será detectado por la bobina debido a la variación del voltaje que fluye por la misma.



**Figura 2.3:** Ensayo con corrientes inducidas [6]

El ensayo mediante corrientes inducidas o parasitarias tiene su principal aplicación en la localización de defectos o imperfecciones en componentes tubulares (cables, barras, etc.). Además, permite su empleo en casi todos los metales (electroconductores y aleaciones) y no requiere contacto directo con la pieza inspeccionada. Sin embargo, su aplicación es muy sensible a las diferencias en la composición y estructura del metal y, por lo general, se necesita de una bobina de prueba diferente para cada pieza inspeccionada.

## 2.1.2.2 Técnicas de Inspección Volumétrica

Estos métodos permiten la detección de defectos internos y sub-superficiales, aportando, por tanto, información relativa al estado interno de los materiales. Las técnicas de inspección volumétricas están constituidas por la radiografía industrial y los ultrasonidos.

### 2.1.2.2.1 Radiografía industrial

El ensayo radiográfico es un método físico de inspección basada en la capacidad de penetración de los rayos X o rayos Gamma, en los distintos materiales. La técnica consiste en irradiar el componente a inspección, de forma que la radiación atraviese el material y se registre en una película radiográfica. Analizando la placa sensible a esta energía, se obtiene la imagen del área inspeccionada, en la cual la presencia de defectos o grietas aparecerán en una tonalidad diferente al de las porciones de material homogéneo, como consecuencia de la retención de la radiación en estas posiciones.



**Figura 2.4:** Ensayo con radiografía industrial [6]

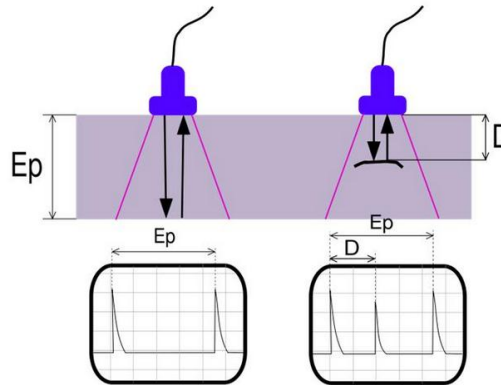
Aunque es un ensayo muy ventajoso ya que permite obtener una imagen visual del interior, así como un registro permanente de la inspección, el empleo de la misma está sujeto a costes muy elevados ya que requiere del empleo de personal altamente capacitado y de instalaciones especiales para su utilización.

### 2.1.2.2.2 Ultrasonido industrial

Es un método no destructivo mediante el cual un conjunto de ondas sonoras de alta frecuencia se propagan por el interior de un material con el fin de detectar y caracterizar los defectos presentes en los mismos. Por tanto, este método se fundamenta en la impedancia acústica, es decir, en la resistencia que oponen algunos materiales al paso de la onda ultrasónica.

Para realizar la técnica se recurre a un transductor piezoeléctrico, el cual genera un pulso incidente que se propaga por el interior del elemento, produciéndose la reflexión del mismo cuando este pulso alcance el límite opuesto del material estudiado (eco de fondo). En el caso de que el componente contenga algún defecto, el pulso

ultrasonico inicial sufrirá un rebote adicional (eco de defecto) pudiéndose visualizar en una pantalla a una distancia proporcional a la profundidad del defecto en la pieza. En la figura 2.5, se puede apreciar de un ejemplo de detección de defectos por el método no destructivo de los ultrasonidos.



**Figura 2.5:** Ensayo con ultrasonidos [23]

Las ventajas presentes son múltiples, ya que permiten su aplicación a una amplia gama de materiales, así como a un gran número de campos como la medicina, la comunicación, etc... En cuanto a los inconvenientes del empleo de esta técnica, es importante resaltar que tan sólo detectan defectos que presenten una magnitud suficiente como para causar alguna variación en el tono del sonido, además de la necesidad de emplear equipos costosos y personal muy cualificado.

## 2.2 Ondas Longitudinales

### 2.2.1 Introducción a las ondas elásticas

El movimiento ondulatorio es un fenómeno muy común que aparece en casi todos los campos de la física. De hecho uno de los progresos más importantes de la física del siglo XX se encuentra en el descubrimiento de que toda la materia está dotada de propiedades ondulatorias [10].

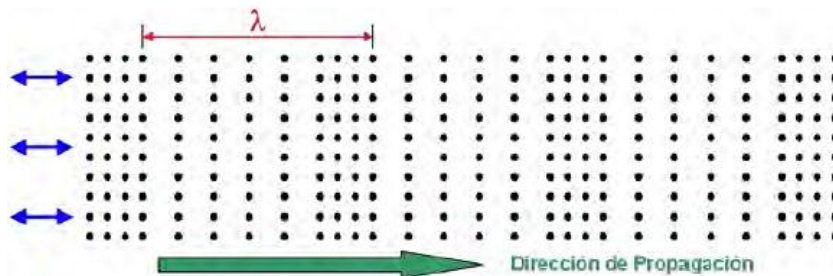
Existen varios tipos de ondas, tales como ondas gravitacionales, electromagnéticas o mecánicas. Mientras que las electromagnéticas se propagan por el espacio sin necesidad de un medio, las ondas mecánicas requieren de un medio elástico para propagarse (ya sea sólido, líquido o gas) y se originan al desplazarse alguna porción de un medio elástico de su posición normal, iniciándose de este modo una oscilación respecto a su posición de equilibrio. Entonces, debido a las propiedades elásticas del medio, dicha perturbación original se transmitirá a las porciones de materia colindantes, y de estas a las siguientes, y así sucesivamente, produciendo que la perturbación se propague por el medio elástico alcanzando todas las porciones del

mismo. Obviamente, no todos los puntos del medio serán alcanzados a la vez por la perturbación, sino que dependerán de la rapidez con la que se propague la onda, siendo esta una velocidad limitada que depende de las propiedades físicas del medio material que se perturba, tales como el módulo de elasticidad, la densidad, la homogeneidad del medio o la temperatura [12]

Finalmente, es reseñable destacar que el medio no se mueve al progresar en él la perturbación, sino que las partículas del mismo oscilan alrededor de un punto fijo describiendo trayectorias limitadas, no existiendo por tanto transporte neto de materia a través del medio.

## 2.2.2 Breve descripción de las ondas longitudinales

Las ondas longitudinales son ondas mecánicas cuya característica fundamental reside en que poseen la particularidad de que el movimiento de oscilación de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Este desplazamiento paralelo genera una secuencia de compresiones entre las partículas del medio. Es por ello que las ondas longitudinales también reciben el nombre de ondas de presión u ondas de compresión. Un ejemplo de una onda longitudinal se observa en la figura 2.6.



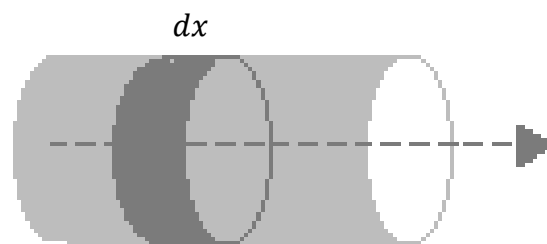
**Figura 2.6:** Onda longitudinal [6]

Cabe reseñar, que estas ondas además de propagarse en cualquier medio (a diferencia de las transversales pueden propagarse en los líquidos y gases, ya que estos no ofrecen ninguna resistencia a los esfuerzos de corte), son fácilmente generadas y detectadas. También tienen la propiedad de ser orientadas y localizadas en un haz concentrado, además de tener la capacidad de alcanzar grandes velocidades.

## 2.2.3 Velocidad de propagación de las ondas longitudinales

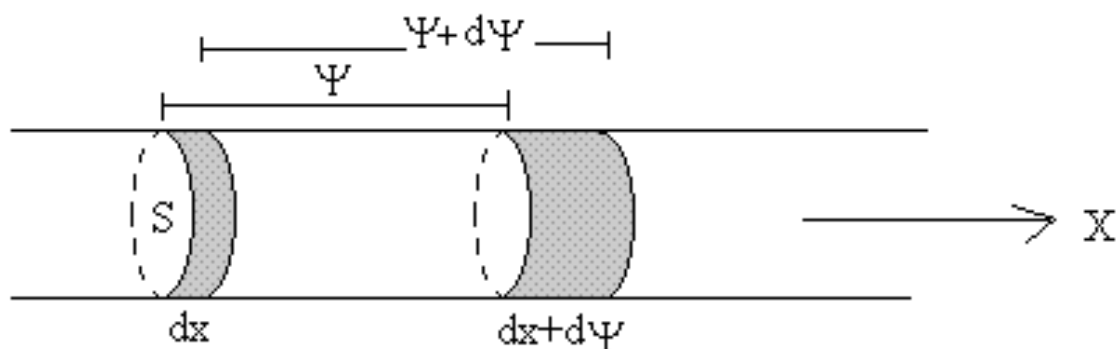
El cálculo de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en una viga (caso de estudio del proyecto) se realiza aplicando los principios fundamentales de la mecánica newtoniana a partir de las características elásticas e inerciales de ésta.

Para la demostración de dicha velocidad se comienza considerando un componente de sección  $S$  constituida por un material homogéneo, isótropo y que se deforma obedeciendo la ley de Hooke, es decir, es linealmente elástico.



**Figura 2.7:** Elemento diferencial de un componente mecánico sin deformar [19]

Considerando un elemento diferencial del componente en la posición  $x$  y de anchura  $dx$ , si sobre uno de los extremos del mismo, se aplica un impacto axial en la dirección de la generatriz, se provoca en ese mismo extremo una perturbación longitudinal que se irá propagando a lo largo del componente con una velocidad determinada por las propiedades físicas de dicho componente, lo que provocará que dicho elemento diferencial se desplace longitudinalmente  $\psi$  y se deforme  $d\psi$ , ocasionando, de este modo, que la nueva anchura del elemento sea  $dx + d\psi$ .



**Figura 2.8:** Deformación del componente mecánico [20]



Para obtener la fuerza actuante sobre la sección del elemento se recurre a la aplicación de la ley de Hooke, expresión que relaciona el esfuerzo normal con la deformación longitudinal unitaria:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (3.1)$$

Y aplicando la expresión que relaciona el esfuerzo normal con la fuerza y el área de la sección transversal, así como la expresión que define la deformación longitudinal unitaria se obtiene:

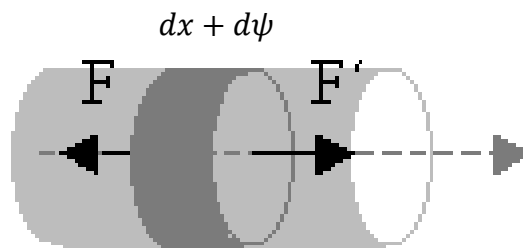
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{d\psi}{dx} \quad (3.3)$$

Así se llega a obtener una expresión que define la fuerza que actúa sobre las caras transversales de la viga, siendo esta función de la sección, del módulo de elasticidad y de la deformación longitudinal unitaria:

$$\frac{F}{S} = E \frac{dx + d\psi - dx}{dx} \quad \Rightarrow \quad F = SE \frac{d\psi}{dx} \quad (3.4)$$

No obstante, al no estar la viga en equilibrio, la fuerza que actúa sobre cada una de las dos secciones del elemento considerado no será la misma. Es decir, mientras que la sección transversal situada a la izquierda del elemento representado en la figura 2.9 está sometida a una fuerza  $F$ , la sección transversal situada a la derecha del elemento diferencial considerado, estará sometida a una fuerza  $F'$ .



**Figura 2.9:** Fuerzas actuantes sobre un elemento deformado [19]

Por tanto, la fuerza resultante sobre dicha elemento será:

$$dF = F' - F = SE \left[ \left( \frac{d\psi}{dx} \right)_{x+dx} - \left( \frac{d\psi}{dx} \right)_x \right] \quad (3.5)$$

Y simplificando, se obtiene:

$$dF = F' - F = SE \frac{d^2\psi}{dx^2} dx \quad (3.6)$$

Además, esta fuerza total definida en la ecuación (3.6) produce un movimiento acelerado de la sección, y por tanto deberá ser igual a la masa del elemento considerado ( $ds = \rho dV = \rho s dx$ ), por la aceleración del mismo, pudiéndose escribir la ecuación del movimiento del elemento como sigue:

$$dF = F' - F = (\rho A dx) \frac{d^2\psi}{dt^2} \quad (3.7)$$

Combinando las expresiones (3.6) y (3.7):

$$SE \frac{d^2\psi}{dx^2} dx = \rho A \frac{d^2\psi}{dt^2} dx \quad (3.8)$$

Se obtiene la ecuación de onda que describe la propagación de una perturbación longitudinal en una viga:

$$\frac{E}{\rho} \frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{d^2\psi}{dt^2} \quad (3.9)$$

Cabe reseñar que la expresión (3.9) tiene la misma forma que la ecuación general del movimiento ondulatorio que se expresa en la ecuación (3.10).

$$c^2 \frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{d^2\psi}{dt^2} \quad (3.10)$$

Y finalmente, a partir de la ecuación diferencial general del movimiento ondulatorio, se deduce la expresión para la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en una componente mecánico o estructural.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.11)$$

Por tanto, la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en una viga depende de la densidad del material y del módulo de Young del mismo, algo que no es trivial, puesto que las ondas longitudinales provocan acortamientos y alargamientos de los elementos que constituyen la viga, y, por ende, pudiendo concluir que el campo de deformación  $\psi$  se propaga a lo largo de la viga en forma de onda. [10]

## 2.3 El método de los elementos finitos

### 2.3.1 Introducción al método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es una técnica de análisis numérico utilizada para resolver un gran número de problemas de ingeniería. Aunque originalmente este método fue desarrollado con el fin de estudiar las tensiones en las estructuras de fuselajes complejos, actualmente se ha extendido su utilización a gran variedad de problemas, como pueden ser problemas de transferencia de calor, electromagnéticos, análisis del comportamiento mecánico de automóviles, etc...

El MEF consiste en realizar una aproximación para obtener la solución de problemas continuos, basado en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado. A esta transformación se le denomina discretización del modelo.

La idea fundamental del MEF consiste en dividir el continuo en un número finito de pequeñas partes denominadas elementos, sobre los cuales son consideradas las propiedades del material y sus ecuaciones constitutivas. Estos elementos poseen unos puntos característicos, denominados nodos, que permiten unir cada elemento con su adyacente.

El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las “funciones de interpolación” o “funciones de forma”. Estas funciones definen de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada elemento finito, expresado en términos de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Es por tanto, una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos. Si bien las verdaderas funciones de forma son desconocidas, se puede sentar la hipótesis de que su expresión aproximada puede ser obtenida en forma polinómica.

La relación entre estos elementos, considerando debidamente las condiciones de contorno (cargas y restricciones), da lugar a un sistema de ecuaciones cuya solución va a permitir obtener resultados mediante los cuales se va a conocer el comportamiento aproximado del modelo continuo.

El MEF se divide en tres etapas:

- Preproceso: En esta etapa se realiza la descripción del problema que se pretende resolver. Para ello se realizan las operaciones de:
  - Dibujo de la geometría del modelo.
  - Selección de las propiedades de los materiales.
  - Aplicación de cargas exteriores y condiciones de contorno.

➤ Discretización del modelo en elementos finitos.

• **Resolución:** En esta etapa se realizan las operaciones necesarias que resuelven las ecuación que se han planteado en el preproceso y, además, se generan las soluciones. En ella se realizan las operaciones de:

- Selección del tipo de cálculo a realizar.
- Configuración de los parámetros de cálculo, intervalos de tiempo y número de iteraciones.
- Transferencia de las cargas al modelo, generación de funciones de forma, ensamblaje de la matriz de rigidez, resolución de sistemas de ecuaciones y obtención de la solución.

• **Postproceso:** En esta última etapa se obtiene la representación gráfica de los resultados, así como otros resultados indirectos que permitan extraer conclusiones del problema.

## 2.3.2 Introducción al programa ABAQUS 6.11-2

Abaqus es un programa informático basado en el Método de los Elementos Finitos, diseñado con el fin de resolver problemas de ciencias aplicadas e ingeniería. Este software puede resolver casi todo tipo de problemas, desde los simples análisis lineales hasta las complejas simulaciones no lineales, como por ejemplo los problemas relacionados con la resistencia de materiales, problemas de mecánica de la fractura, vibraciones, ingeniería forense, procesos de conformado de metales, transferencia de calor, etc....

Abaqus está estructurado en tres grandes bloques, que se corresponden con las tres etapas en que se divide un problema para ser analizado por el Método de Elementos Finitos (preproceso, resolución, y postproceso).

El código Abaqus se encuentra dividido en cuatro productos:

• **Abaqus/Standard:** Empleado para la resolución de problemas tanto estáticos como dinámicos a baja velocidad. Este producto se caracteriza porque permite analizar un modelo, en una única simulación, tanto en el tiempo como en el dominio de la frecuencia.

• **Abaqus/Explicit:** Orientado para la resolución de problemas dinámicos, como por ejemplo los impactos en automoción o en balística. Es poderoso por su eficiencia computacional en grandes modelos, y también altamente efectivo para aplicaciones cuasi-estáticas.

• **Abaqus/CAE:** Producto interactivo para la creación de modelos de elementos finitos. Permite crear, editar y monitorizar de manera rápida y eficiente los modelos que se van desarrollando.

- Abaqus/Viewer: Permite la visualización de las soluciones obtenidas una vez resuelto el problema.

Para resolver un problema mediante ABAQUS 6.11-2 se deben introducir los datos de entrada que necesita el programa. Esta etapa se corresponde con la etapa de preproceso del Método de los Elementos Finitos.

Los datos de entrada se introducen en el programa a través de un archivo de texto (*input file*) que contiene toda la información necesaria para realizar la simulación. Este archivo de texto, también denominado “archivo de entrada”, se puede crear de forma interactiva utilizando Abaqus/CAE, que genera internamente el archivo de texto, o mediante un editor de texto, donde el archivo es escrito directamente por el usuario.

Los datos que se introducen en el archivo de entrada son de dos tipos, *model data* y *history data*.

Los *model data* que se utilizan para definir el modelo de elementos finitos son:

- Geometría. La geometría es lo primero que se introduce y debe representar lo más fielmente posible el cuerpo real que se va a estudiar. Abaqus permite realizar modelos de geometría muy compleja, gracias al módulo Abaqus/CAE. La geometría, así como el mallado de un modelo, se define mediante los elementos y sus nodos.

- Material. El modelo que se va a implementar puede estar formando de varios materiales. Se deben definir las propiedades de los distintos materiales de los que está formado nuestro modelo, y se deben asociar a las partes de la geometría a las que correspondan.

- Partes y ensamblaje. La geometría del modelo se puede definir organizándola en partes, por lo tanto, hay que introducir en el archivo de entrada la relación que existe entre esas partes, además de la posición relativa de unas respecto de las otras. Esto se lleva a cabo a través de un procedimiento conocido como ensamblaje.

- Condiciones iniciales. Se deben especificar las condiciones iniciales del modelo. En ocasiones, es necesario especificar condiciones iniciales distintas de cero para tensiones, temperaturas, velocidades, etc.

- Condiciones de contorno. El modelo puede estar sometido a ciertas imposiciones por parte de su entorno que deben ser especificadas en el archivo de entrada. Se pueden imponer restricciones del movimiento, valores de desplazamientos y rotaciones o condiciones de simetría.

- Interacciones. En ocasiones el modelo que se desea estudiar puede estar formado por varios cuerpos que en un momento dado sufren una interacción o un contacto. Abaqus permite también realizar modelos ante este tipo de situaciones.

- Definiciones de amplitud. Ciertos estados de carga y condiciones de contorno pueden estar definidas en función del tiempo, por lo tanto se deben introducir los parámetros de las curvas que definen esos estados de cargas y condiciones de contorno.
- Propiedades del entorno. Se pueden definir las características del entorno, como puede ser la humedad, temperatura, presión, etc.
- Continuación de análisis. Consiste en introducir resultados de análisis previos para continuar buscando resultados con el nuevo modelo.

Después de introducir el archivo de entrada en el programa, se procede a la resolución del modelo. Esta fase es interna y en ella Abaqus no interacciona con el usuario. Una vez que Abaqus ha resuelto el modelo, los resultados de la simulación se ven a través del módulo de visualización, el cual, lee el archivo de datos de salida (*output file*), y es capaz de crear animaciones de la simulación, gráficos, tablas de resultados, etc. La visualización de los resultados se corresponde con la etapa de postproceso del Método de Elementos Finitos.

# 3

## Planteamiento del problema

---

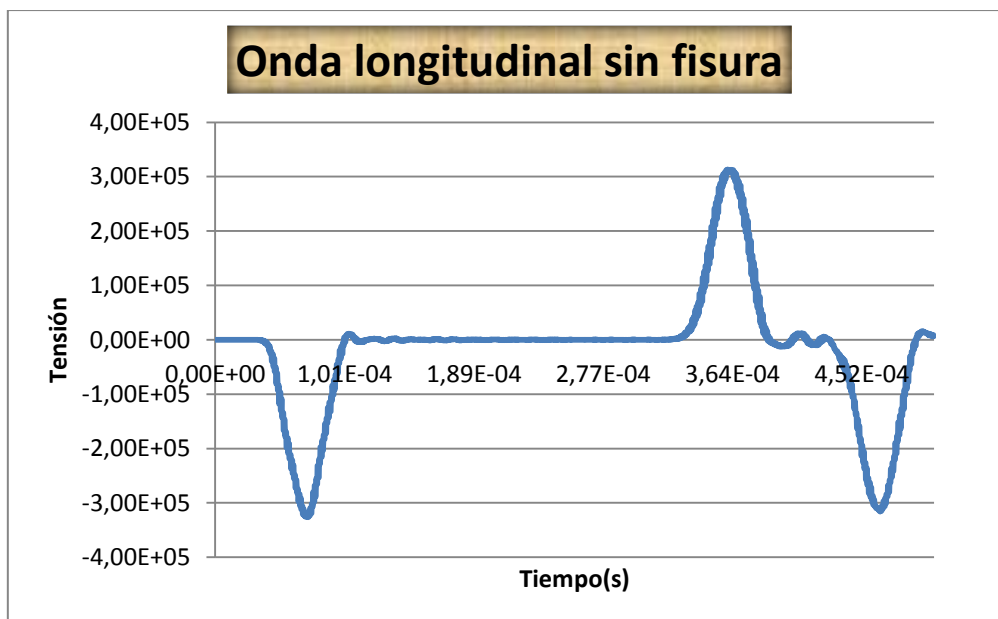
*En este capítulo se expone la línea de investigación hacia la que está dirigido el proyecto, planteando la relación entre la detección de fisuras y la influencia de la propagación de las ondas en un sistema. También, se realiza una breve descripción de la metodología empleada durante todo el proyecto para la detección de fisuras, finalizando el capítulo mediante la caracterización del tipo de fisura y de viga empleada en el proyecto, para seguidamente presentar tanto el modelo numérico obtenido como la implementación del programa desarrollado para la obtención de dicho modelo.*

## 3.1 Descripción del método

La finalidad del presente proyecto consiste en el análisis de un método no destructivo que permita la detección de fisuras en el interior de un elemento mecánico, sometido a una determinada sollicitación, mediante el análisis de las ondas longitudinales que se propagan por el interior del elemento.

El impacto axial en elementos elásticos produce ondas longitudinales que afectan al análisis dinámico de los mismos únicamente si dichos elementos presentan una geometría finita.

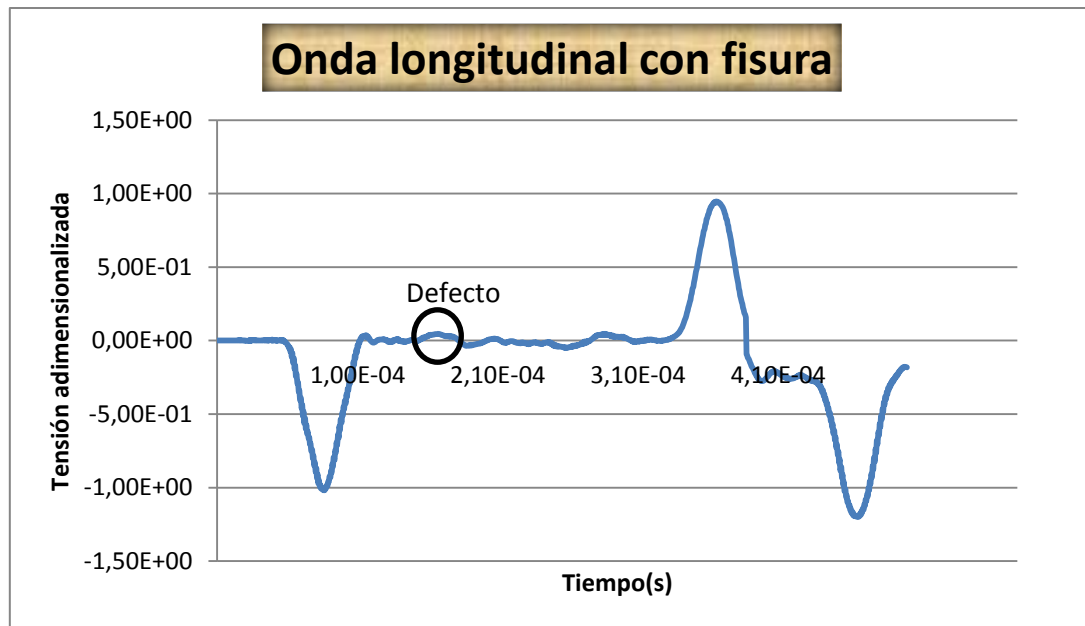
Durante el impacto, la onda longitudinal compresiva se propaga entre las partículas del medio a una velocidad finita que es función del material del elemento, como se ha indicado en el capítulo precedente (Ec.2.11). Una vez que esta onda de esfuerzo compresivo llegue al extremo opuesto del componente estudiado, se reflejará como una onda de tracción regresando al punto de impacto aproximadamente con la misma amplitud que el pulso inicialmente emitido.



**Figura 3.1:** Propagación de la onda por una viga intacta

No obstante, en el caso de que en el interior del componente exista algún defecto mecánico, como por ejemplo una grieta, la onda compresiva inicial se propagará por el componente hasta alcanzar la fisura, donde se perturbará provocando que parte de la onda compresiva continúe viajando por el medio hasta el extremo opuesto, mientras que otra parte de la onda, más pequeña que la anterior, se refleje en la fisura regresando como una pequeña onda de tracción, y con una amplitud, por supuesto, mucho menor que la onda inicial.



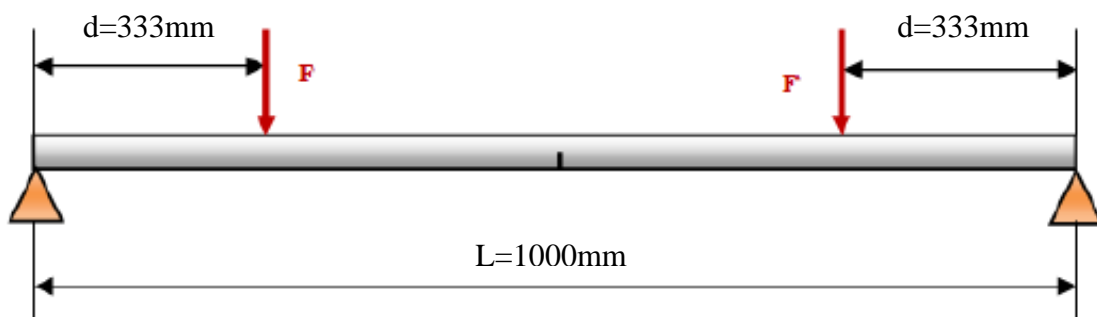


**Figura 3.2:** Propagación de la onda por una viga con fisura

El procedimiento que se propone reside, por tanto, en detectar y analizar la onda de tracción que se refleja en la sección fisurada con el fin de determinar la localización y la profundidad exacta de la misma, a partir del estudio de una viga de sección constante, sometida a un estado de flexión pura y con una fisura de frente recto en el centro de la viga.

## 3.2 Metodología

Detectar e identificar una fisura en un componente longitudinal solicitado, como la viga que se presenta en la figura 3.3, consiste en conocer dos parámetros: la posición de la fisura en el elemento mecánico considerado y la profundidad de la misma.



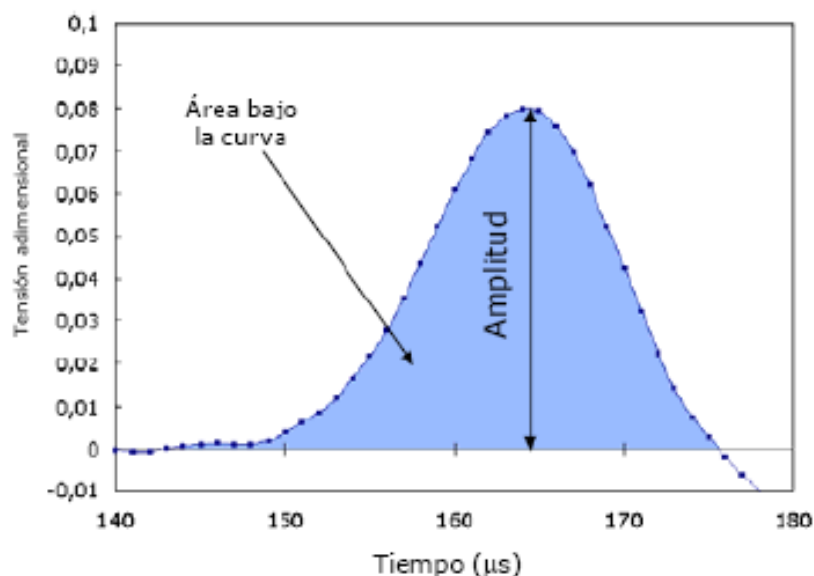
**Figura 3.3:** Viga solicitada sometida a fisura [15]

El estudio de las fisuras se realiza atendiendo a dos posibles métodos, o bien se conocen los parámetros de la fisura y se obtienen a partir de ellos la forma de la onda viajera, o bien, se conoce la onda de tensión de una viga fisurada y se determina si existe la fisura, así como la localización y profundidad de la misma.

### 3.2.1 Método directo

El método directo consiste en la determinación y obtención del comportamiento de la onda de tensión que se propaga por la viga, a partir, del conocimiento de las características de la fisura (localización, forma y profundidad de la misma). Por tanto, se podría afirmar, que este método es fundamentalmente aplicable como demostración de la posible existencia de un ensayo no destructivo on-line capaz de detectar fisuras en el interior de las vigas (o cualquier otro componente unidimensional de sección constante), puesto que su aplicación está ajustada al conocimiento de la localización y de la forma de la fisura en el interior de la viga.

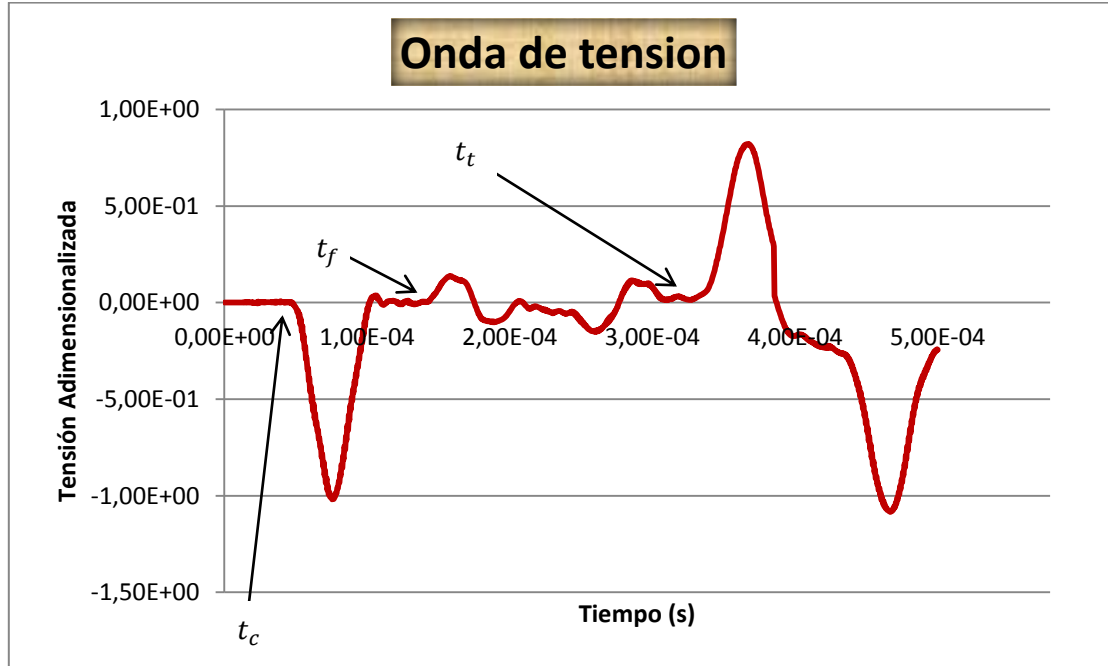
Sin embargo, es reseñable indicar que para la utilización del método inverso (mediante el cual se estudian las fisuras sin conocer previamente ningún dato de las mismas), es condición imprescindible resolver previamente el método directo, ya que aunque con este método se obtienen las ondas conocidas todos los parámetros de las fisuras, también permite establecer la relación existente entre las propiedades de la onda que se propaga y los parámetros característicos de la fisura, pudiendo posteriormente, cuando se resuelva el problema inverso, acudir a estas relaciones y obtener los parámetros característicos de la fisura para cualquier tipo de componente estudiado. En la figura 3.4, se muestra un ejemplo de las propiedades que definen la onda y que servirán en capítulos posteriores para caracterizar la fisura.



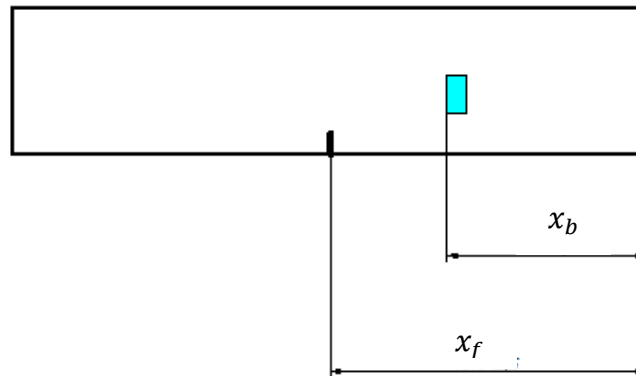
**Figura 3.4:** Propiedades de la onda [3]

### 3.2.2 Método inverso

El método inverso, al contrario que el anterior, permite conocer la existencia de una fisura y determinar la localización y profundidad de la misma a partir de una onda de tensión, como la que se puede apreciar en la figura 3.5, obtenida a partir de los datos registrados por banda extensométrica situada como indica la figura 3.6



**Figura 3.5:** Onda de tensión



**Figura 3.6:** Detalle de la posición del sensor y la fisura en la viga

La localización de la fisura se determina acudiendo a la siguiente expresión:

$$x_f = x_b + \frac{c_o}{2} (t_f - t_c) \quad (3.1)$$

Siendo:

- $c_o$  la velocidad de propagación de las ondas en la viga
- $x_b$  la posición del sensor respecto del punto de impacto inicial.
- $t_f$  el instante en el que la onda es reflejada por la fisura.
- $t_c$  corresponde al instante en el que la banda extensométrica detecta la onda de compresión inicial.

No obstante, una de las múltiples ventajas de este método es que permite detectar fisuras aunque el material de estudio sea desconocido, pudiendo obtenerse la velocidad de propagación como sigue:

$$c_o = \frac{2(L-x_b)}{(t_t-t_c)} \quad (3.2)$$

Sabiendo que  $t_t$  pertenece al momento en que el sensor detecta el retorno de la onda de compresión al extremo inicial, ya como una onda de tracción, se puede escribir una ecuación general que permite la localización de una fisura a partir de la forma de la onda (Ecuación 3.3).

$$x_f = x_b + \frac{(L-x_b)}{(t_t-t_c)}(t_f - t_c) \quad (3.3)$$

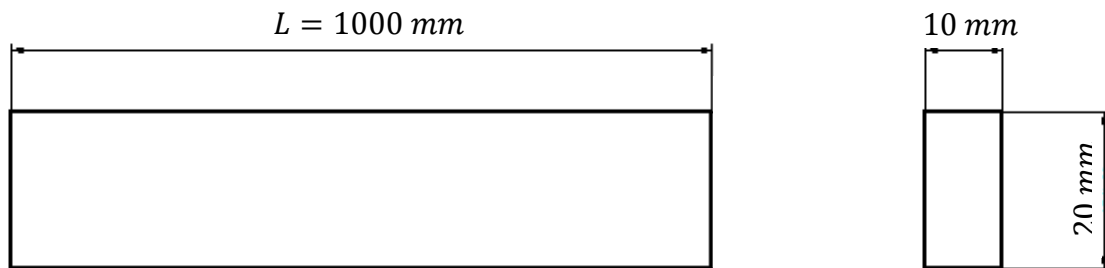
En cuanto a la profundidad de la fisura, cabe reseñar, que esta es función de la amplitud de la fisura y por tanto del área encerrada bajo la misma. Como se apreciará en futuros capítulos tanto por el método directo como por el inverso, a medida que la profundidad de la fisura aumenta, también lo hará la amplitud de la onda de tracción que se refleje, ya que la onda inicial se encuentra con una superficie mayor.

Por tanto, mientras que la determinación de la localización de la fisura se obtiene de forma inmediata, para obtener la profundidad de la grieta, es preciso acudir a la curva de tensión de la onda, obtener el valor del área relativa bajo la curva (o de la amplitud) y finalmente a partir de ese valor obtener una aproximación bastante exacta de la profundidad de la fisura, mediante el empleo de una gráfica en la que se representa la evolución del área o la amplitud en función de todos los posibles valores de la profundidad.

En el capítulo de resultados y discusión se podrá apreciar con más claridad el empleo de ambos métodos y la forma de extracción de datos de los mismos.

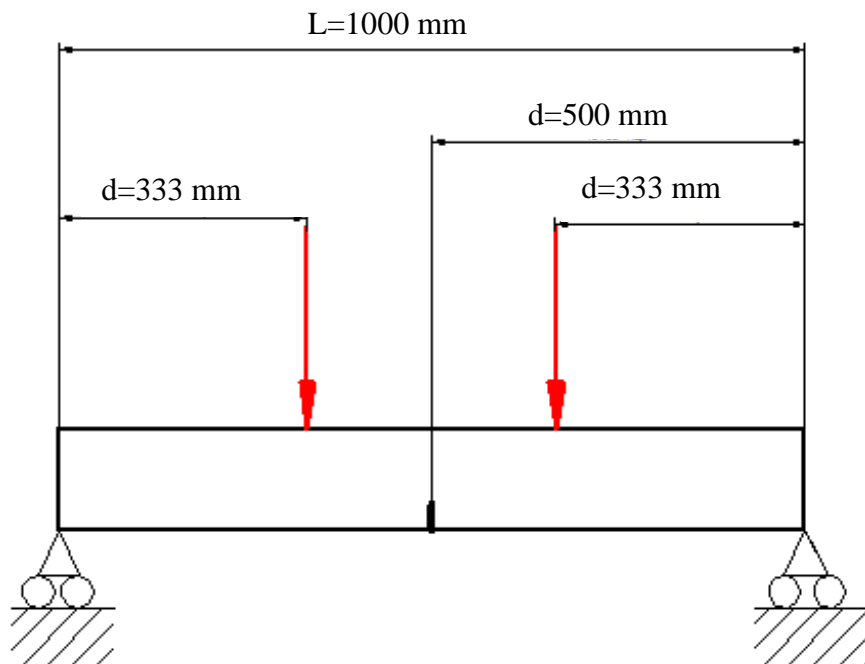
### 3.3 Características de la viga

La viga empleada para la realización de este proyecto está confeccionada por un acero con un módulo de elasticidad de  $E = 210\text{GPa}$ , un coeficiente de Poisson de  $\nu = 0.3$  y una densidad de  $\rho = 7850\text{ kg/m}^3$ . La viga cuenta con una longitud de 1000 milímetros y con una sección transversal rectangular de 10 milímetros de espesor y 20 milímetros de canto. El detalle de la viga y su correspondiente sección se muestran en la figura 3.7.



**Figura 3.7:** Viga empleada para el análisis del proyecto

La viga empleada para el análisis contiene en la sección central una fisura de frente recto y se encuentra apoyada por ambos extremos, permitiendo su desplazamiento respecto al eje de la directriz. Esta viga está sometida, a su vez, a dos cargas concentradas de 1 Newton cada una y situadas ambas a una distancia de 333 milímetros de los extremos, consiguiéndose de este modo un estado de flexión pura en la sección de la fisura (Figura 3.8).



**Figura 3.8:** Viga biapoyada con cargas.

En cuanto al punto de control seleccionado para ubicar la banda extensométrica, este se obtuvo teniendo en cuenta dos consideraciones:

1. Estar situado a una distancia óptima que permitiese que la onda y sus respectivas reflexiones viajen durante un mayor periodo de tiempo sin que interaccionen entre ellas, consiguiendo de este modo una mayor claridad en los resultados obtenidos.

2. Debía permitir que cuando la primera onda llegara hasta la posición del sensor, el impacto sobre la viga se había realizado completamente.

Para satisfacer estas premisas la obtención del punto de control se realizó acudiendo a la siguiente relación cinemática:

$$c_0 = \frac{e}{t} \quad (3.4)$$

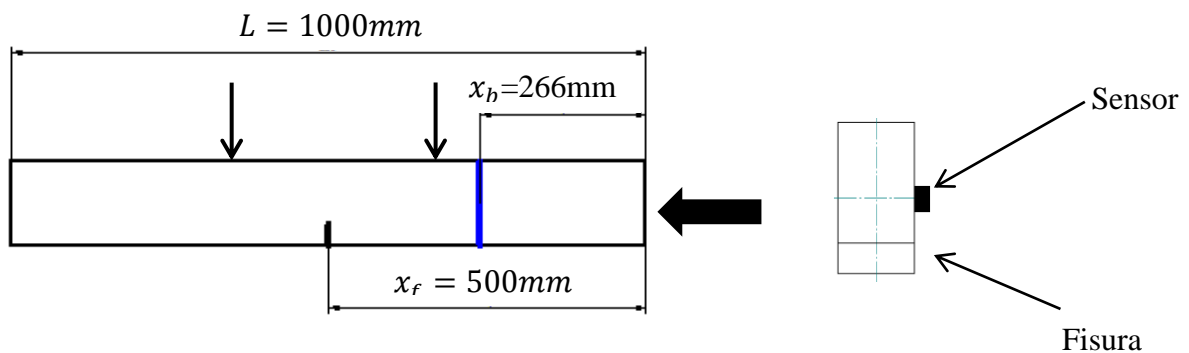
Dónde:

- $c_0$  es la velocidad de propagación de la onda, que en el acero es de  $5172 \text{ m/s}$
- $t$  es el tiempo de aplicación de la carga, es decir,  $5e^{-6}$  segundos
- $e$  es la distancia recorrida por la onda.

Por tanto, a raíz de estos datos, el punto de control se situó:

$$e = 0,2586m \approx 0.26 \text{ m}$$

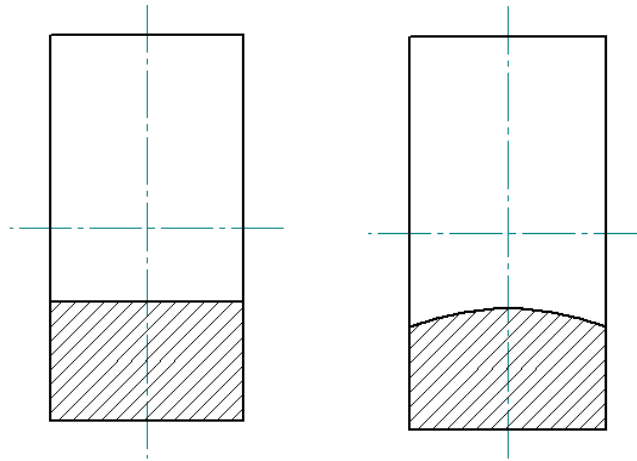
Por último, teniendo en cuenta la realización de múltiples estudios previos realizados [3] se decidió ubicar el sensor a la derecha de la sección transversal del punto de control, ya que era el punto donde se obtenían una mayor claridad en los resultados.



**Figura 3.9:** Esquema del ensayo y detalle de la sección fisurada

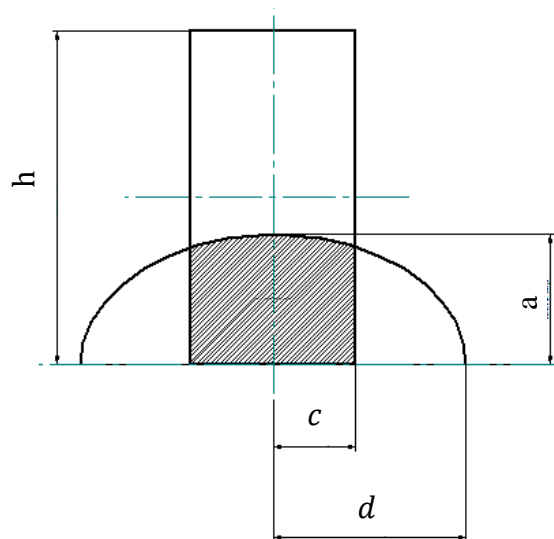
## 3.4 Características de la fisura

En los componentes mecánicos pueden aparecer dos tipos de fisuras: fisuras de frente recto y fisuras de frente elíptico. Mientras que en la gran mayoría de elementos giratorios fisurados, como por ejemplo ejes, la fisura presenta un frente elíptico, las fisuras presentes en las vigas suelen ser de frente recto. Por tanto, en este proyecto, y en aras de una mayor simplicidad, se trabajará únicamente con fisuras de frente recto. En la figura 3.10 se muestra un ejemplo de los dos tipos de fisuras.



**Figura 3.10:** Tipos de fisuras

El tipo de fisura presente en un elemento mecánico depende de los parámetros característicos de la misma (longitud característica y factor de forma), y estos, a su vez, dependen de las características geométricas de la viga. En la figura 3.11 se muestra en detalle la sección de una fisura de frente elíptico.



**Figura 3.11:** Geometría transversal de la fisura.

Por tanto, los parámetros que determinan el tipo y las características de la fisura son:

➤ Longitud característica de la fisura ( $\alpha$ ): se define como el cociente entre la profundidad de la fisura y la altura de la sección transversal.

$$\alpha = \frac{a}{h} \quad (3.5)$$

➤ Factor de forma de la fisura ( $\beta$ ) : se define como el cociente entre la profundidad de la fisura y el semieje mayor del frente elíptico.

$$\beta = \frac{a}{d} \quad (3.6)$$

Por tanto, si  $\beta = 1$  la fisura será de frente semicircular, mientras que si  $\beta = 0$ , la fisura será de frente recto [3]. Como bien se ha comentado, en lo que sigue únicamente se tratarán fisuras que presenten un factor de forma nulo, para longitudes características que varíen entre 0,1 y 0,5 en intervalos de 0,1.

## 3.5 Programación del modelo numérico mediante lenguaje Phyton

Con el fin de desarrollar el modelo numérico se ha desarrollado un script mediante el lenguaje de programación Phyton que permita obtener de forma automatizada las características de la viga y de la fisura, así como definir el tipo de análisis a realizar y las condiciones de contorno a las que estará sometido el modelo.

La finalidad que ha conducido a la realización de esta aplicación informática reside fundamentalmente en la búsqueda de la optimización de los recursos empleados, permitiendo la automatización de las tareas repetitivas, como por ejemplo la definición de las características de la viga, las cargas o el tipo de análisis.

Por este motivo, se ha desarrollado un script muy sencillo e intuitivo que permite el estudio y análisis de vigas fisuradas sometidas a flexión para diferentes profundidades de fisuras y, si procediese, para diferentes localizaciones de la misma a lo largo de la viga, mediante la variación de algunos parámetros y sin la necesidad de realizar un nuevo modelo en el programa de elementos finitos Abaqus, obteniéndose, por tanto, una disminución considerable del tiempo empleado en la realización del trabajo.



Por tanto, tras lo comentado previamente se puede afirmar que, el objetivo primordial del desarrollo de la aplicación es poder definir de manera rápida y efectiva las diferentes profundidades a las que se encontrará la fisura presente en la viga. No obstante, su uso no sólo se ha limitado a la variación de dichas profundidades, sino también a la variación de la fisura a lo largo del eje (situándola finalmente en la mitad ya que es el punto donde mayor momento flector sufre la viga) e incluso a la variación de otros parámetros relacionados con las condiciones de contorno, como por ejemplo el valor de las cargas aplicadas. En las figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 se muestran algunos de los fragmentos del código implementado para obtener el modelo numérico, que se detallará en el apartado siguiente.

```
# Autor: Carlos Javier Sanchez
# Tutora: Lourdes Rubio

from abaqus import *
from abaqusConstants import *
import regionToolset

session.viewports["Viewport: 1"].setValues(displayedObject=None)

#-----
#Creamos el modelo
#En primer lugar renombraremos el modelo.

mdb.models.changeKey(fromName= "Model-1" , toName= "VIGA")
beamModel=mdb.models["VIGA"]

#-----
#VARIABLES#
#-----
#Asignamos valor a las variables empleadas

q=0.15
L1=0.5+q    #Parte_1
w=-0.15
L2=0.5+w    #Parte 2

L=L1+L2
h=0.02      #Altura
e=0.01      #Espesor
t=w-0.166   #Plano de la carga puntual_1
f=w+0.166   #Plano de la carga puntual_2
m=w-0.24    #Sensor
```

**Figura 3.12:** Fragmento del código en Python. Asignación de las variables

```
#-----  
#Creacion de la seccion  
  
import sketch  
import part  
  
beam1ProfileSketch=beamModel.ConstrainedSketch(name="VIGA_PARTE_1",sheetSize=5)  
beam1ProfileSketch.rectangle(point1=(0,0), point2=(e,h))  
beam1Part=beamModel.Part(name="VIGA_PARTE_1", dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)  
beam1Part.BaseSolidExtrude(sketch=beam1ProfileSketch, depth=L1)  
  
#Dibujo de la geometria de la segunda parte que compone el modelo.  
beam2ProfileSketch=beamModel.ConstrainedSketch(name="VIGA_PARTE_2",sheetSize=5)  
beam2ProfileSketch.rectangle(point1=(0,0), point2=(e,h))  
beam2Part=beamModel.Part(name="VIGA_PARTE_2", dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)  
beam2Part.BaseSolidExtrude(sketch=beam2ProfileSketch, depth=L2)  
  
#-----  
#Creamos el material.  
  
import material  
beamMaterial=beamModel.Material(name="Acero")  
beamMaterial.Density(table=((7850, ), ), )  
beamMaterial.Elastic(table=((210E9, 0.3), ), )
```

**Figura 3.13:** Fragmento del código en Phyton. Creación de las partes y material.

```
#-----  
#Creamos el Assembly  
  
import assembly  
  
beamAssembly=beamModel.rootAssembly  
  
beam1Instance=beamAssembly.Instance(name= "Viga_1", part=beam1Part,dependent=OFF)  
beam2Instance=beamAssembly.Instance(name= "Viga_2", part=beam2Part,dependent=OFF)  
  
# Posicionamos una de las caras del perfil de la Viga 1.  
beam1_constraint_face_1_point=(e, h, 0)  
beam1_constraint_face_1=beam1Instance.faces.findAt(beam1_constraint_face_1_point,)  
  
# Posicionamos una de las caras del perfil de la Viga 2.  
beam2_constraint_face_1_point=(e, h, 0)  
beam2_constraint_face_1=beam1Instance.faces.findAt(beam1_constraint_face_1_point,)  
  
beamAssembly.FaceToFace(movablePlane=beam1_constraint_face_1, fixedPlane=beam2_constraint_face_1, flip=OFF, clearance=L1)  
  
beamModel.rootAssembly.DatumPlaneByPrincipalPlane(offset=f,  
principalPlane=XYPLANE)  
  
beamModel.rootAssembly.DatumPlaneByPrincipalPlane(offset=t,  
principalPlane=XYPLANE)
```

**Figura 3.14:** Fragmento del código en Phyton. Ensamblaje de la viga.

```
#Creamos el analisis
import step
beamModel.StaticStep(initialInc=0.1, minInc=1e-09,
name="Caso_viga_Estatico", previous="Initial",
description="La carga se aplica durante 1 segundo durante este Step", timePeriod=1)

beamModel.ImplicitDynamicsStep(initialInc=0.0005, maxNumInc=10000,
minInc=5e-09, name="Caso_viga_Dinamico", previous="Caso_viga_Estatico",
description="La onda se propaga durante 0.0005 segundos durante este Step", timePeriod=0.0005)
#-----
#Creamos el historial de salidas

beamModel.fieldOutputRequests.changeKey(fromName="F-Output-1", toName= "Selecion de salidas_1")
beamModel.fieldOutputRequests['Selecion de salidas_1'].deactivate('Caso_viga_Dinamico')
beamModel.FieldOutputRequest(createStepName='Caso_viga_Dinamico', name='F-Output-2',timeInterval=1e-06,
variables=('S', ))
beamModel.historyOutputRequests.changeKey(fromName='H-Output-1', toName= "Selecion historial_1")
beamModel.historyOutputRequests['Selecion historial_1'].deactivate('Caso_viga_Dinamico')
beamModel.HistoryOutputRequest(createStepName='Caso_viga_Dinamico',
name='H-Output-2', timeInterval=1e-06, variables=PRESELECT)

#-----
#Creamos las interacciones
beam_region= regionToolset.Region
beam1_region= regionToolset.Region
beam2_region= regionToolset.Region

beamModel.Tie(adjust=ON, master=beam1_region(
side1Faces=beamModel.rootAssembly.instances['Viga_2'].faces.getSequenceFromMask(
mask=('[#80000 ]', ), ), ), name='Constraint-1', positionToleranceMethod=
COMPUTED, slave=beam2_region(
side1Faces=beamModel.rootAssembly.instances['Viga_1'].faces.getSequenceFromMask(
mask=('[#8000000 ]', ), ), ), thickness=ON, tieRotations=ON)
```

**Figura 3.15:** Fragmento del código en Python. Creación del tipo de análisis e interacción  
a  $\alpha = 0.5$

```
#-----
#Generamos el mallado

import mesh

beamModel.rootAssembly.seedPartInstance(deviationFactor=0.1,
minSizeFactor=0.1, regions=(
beamModel.rootAssembly.instances['Viga_1'],
beamModel.rootAssembly.instances['Viga_2']), size=0.002)

beamModel.rootAssembly.generateMesh(regions=(
beamModel.rootAssembly.instances['Viga_1'],
beamModel.rootAssembly.instances['Viga_2']))

import job

#Creamos el trabajo
mdb.Job(name="Viguilla", model="VIGA", type=ANALYSIS)

#Corremos el caso
mdb.jobs["Viguilla"].submit(consistencyChecking=OFF)
```

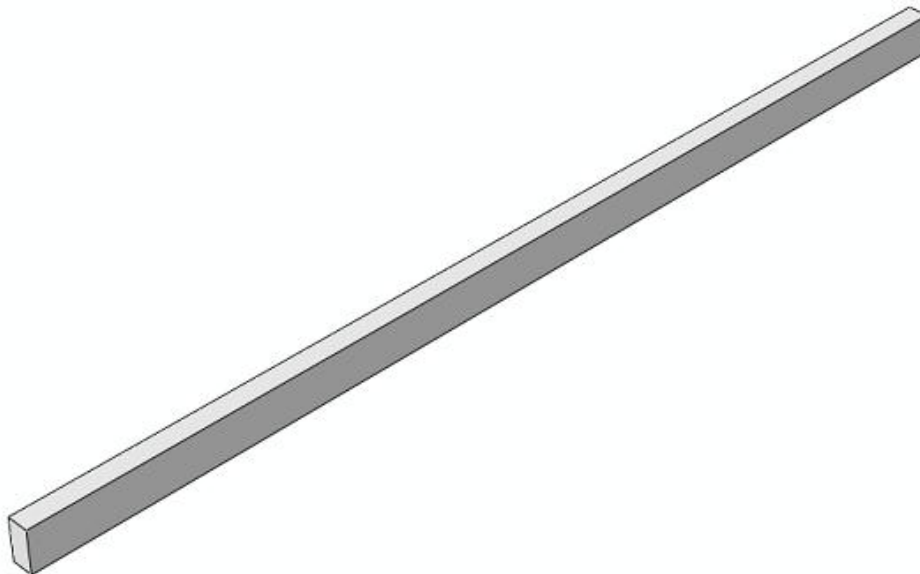
**Figura 3.16:** Fragmento del código en Python. Mallado y lanzamiento del caso

## 3.6 Modelo numérico

Para concluir este capítulo se va a detallar el procedimiento que la herramienta informática de análisis y simulación Abaqus realiza a la par que se va ejecutando el script realizado mediante el lenguaje Python, es decir, en este apartado se explican los pasos que se tendrían que realizar con el programa informático Abaqus, con el fin de que el lector adquiriera una mayor comprensión acerca de las características que componen el modelo numérico del presente proyecto.

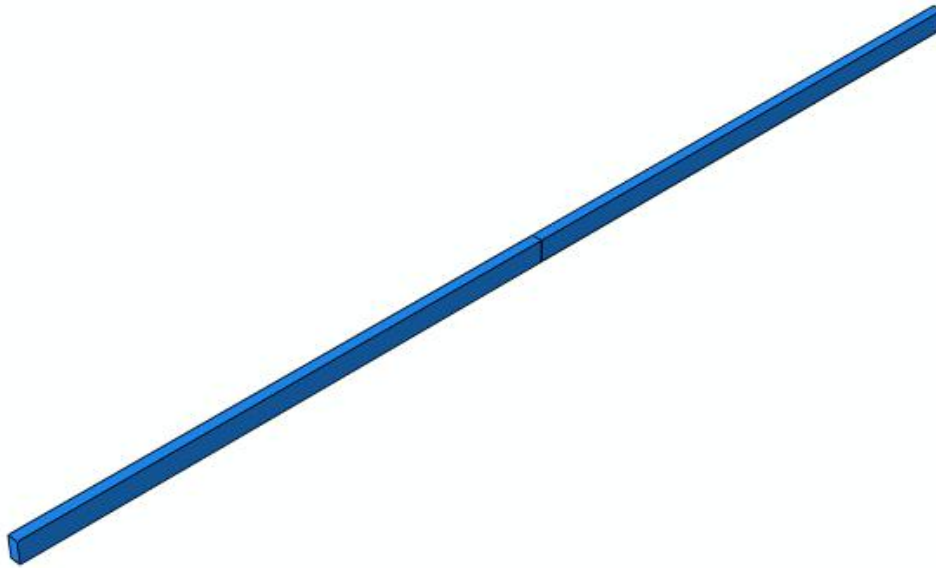
### ➤ Geometría del modelo

El primer paso necesario para el desarrollo del análisis numérico consiste en el diseño del componente mecánico a estudiar, en el caso relativo al proyecto, la viga fisurada. Para ello recurre al primer módulo de los diez que consta Abaqus 6.11, donde se definirán dos partes, idénticas y simétricas respecto del eje de coordenadas, que compondrán la viga a estudio. Puesto que la viga consta de unas dimensiones de un metro de longitud y la fisura está centrada a la misma, el modelado de cada una de estas partes se realiza con una extrusión de 0,5 metros de largo, teniendo, además ambas, una sección de 20 milímetros de altura y 10 milímetros de espesor. En la figura 3.17 se muestra el modelado de una de las partes que componen el modelado de la viga.



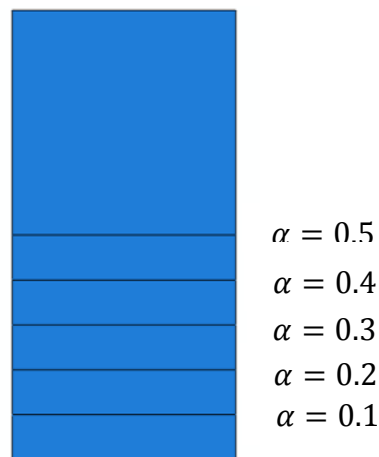
**Figura 3.17:** modelado de una parte de la viga de estudio.

Posteriormente, se realiza la unión de ambas partes, dentro del módulo ensamblaje, siendo la zona de contacto entre dichas partes la región donde se define la fisura (Figura 3.18).



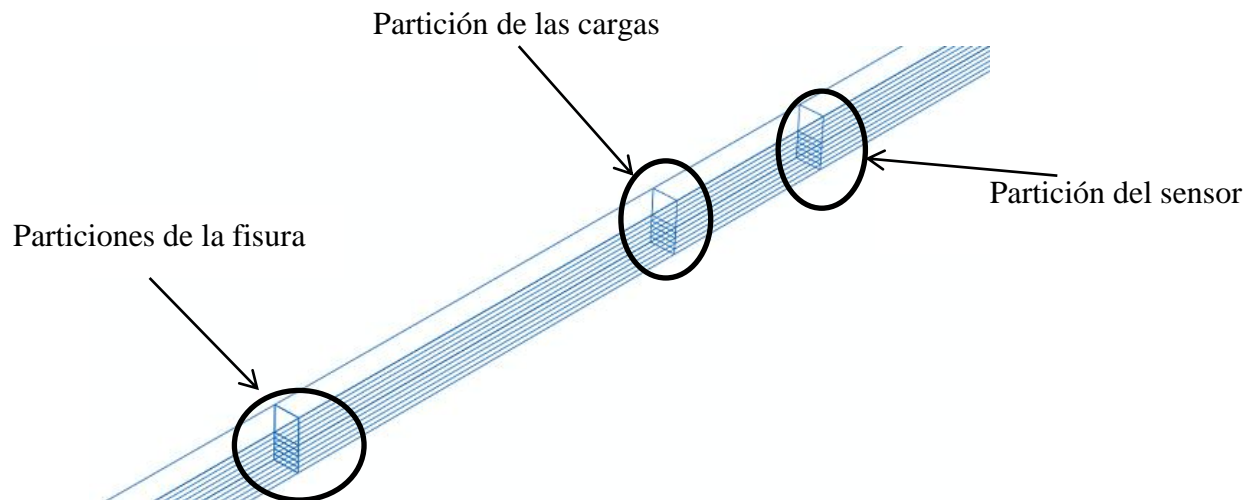
**Figura 3.18:** Geometría de la viga en Abaqus

Una vez definido la viga del modelo, se han de realizar una serie de particiones, cuya finalidad será el modelado de la presencia de fisuras en la viga. Puesto que se analizan fisuras con cinco longitudes características distintas  $\alpha = 0.1$ ,  $\alpha = 0.2$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $\alpha = 0.4$  y  $\alpha = 0.5$  se efectuarán cinco particiones paralelas a la directriz de la viga ensamblada, en uno de los extremos de la misma, que se extenderán a lo largo de toda la viga. En la figura 3.19 se pueden apreciar las cinco profundidades analizadas de fisura de frente recto.



**Figura 3.19:** Detalle de las particiones para  $\beta = 0$

Finalmente, también se desarrollan tres particiones perpendiculares a la viga, dos en las secciones de aplicación de las cargas puntuales ( $L = 333$  y  $666$  milímetros, respectivamente), y otra en la sección donde se sitúa el sensor ( $L = 260$  mm), con el fin de conseguir un mayor refinamiento en el mallado en esa posición. Estas particiones se pueden observar con más claridad en la figura 3.20. Nótese que aunque la fisura no se ha modelado como una partición, se puede considerar como tal ya que en dicha sección la viga está dividida en dos mitades.



**Figura 3.20:** Particiones de la viga

### ➤ Propiedades del material

Una vez modelada la viga es preciso definir las propiedades mecánicas del material con el que está confeccionada la misma. El material empleado es el acero y cuenta con las siguientes propiedades:

Densidad ( $\rho$ )	7850 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young ( $E$ )	210 GPa
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0.3

**Tabla 3.1:** Propiedades del material de la viga.

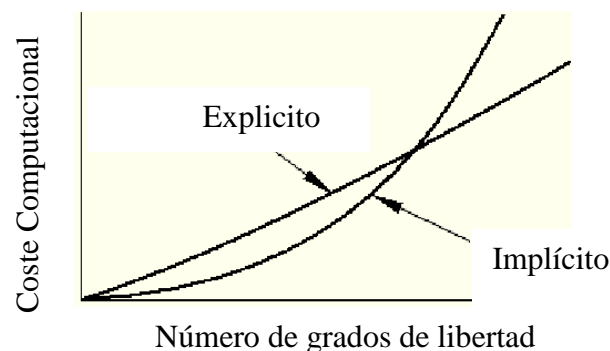
### ➤ Definición del tipo de análisis

En este módulo se define el tipo de análisis que se va a realizar sobre el problema. Puesto que estamos ante un problema dinámico, donde las magnitudes cambian a lo largo del tiempo, se puede proceder de dos maneras:

- Utilizando métodos implícitos, donde para ello será necesario generar dos “Steps” dentro del mismo módulo, uno estático para simular las cargas puntuales y otro dinámico que se encargará de simular el impacto del percutor.

- Combinando métodos explícitos e implícitos, siendo en este caso necesario utilizar dos modelos para la resolución del análisis. El método de proceder consistirá en resolver en primer lugar, el modelo estático y posteriormente importar dicho modelo ya flectado a otro dinámico y explícito, dónde se aplicarán las pertinentes condiciones de contorno que simulen el impacto.

Aunque el empleo de métodos explícitos dinámicos tiene un menor coste computacional que el empleo de métodos implícitos dinámicos (figura 3.21), para la simulación y análisis de la viga fisurada se decidió utilizar métodos implícitos, puesto que el coste computacional no era excesivamente diferente empleando uno u otro método, y, además, si se decidía analizar la viga fisurada mediante métodos dinámicos explícitos era necesario crear en la aplicación un nuevo modelo, a partir de la importación del modelo estático implícito, provocando de este modo que el tiempo empleado en la elaboración de la aplicación aumentase, y por ende, provocando que los tiempos empleados para la elaboración y resolución del problema por ambos métodos sea muy semejante.



**Figura 3.21:** Comparativa coste computacional [14]

En la figura siguiente se aprecian los dos tipos de análisis empleados, así como el tiempo deseado de duración del análisis. Se puede apreciar que el tiempo de duración del análisis dinámico es tan sólo de  $500 \mu s$ , ya que ese es el periodo de tiempo máximo en el que las ondas longitudinales (que poseen elevada velocidad) permiten apreciar resultados coherentes, antes de que empiecen a interaccionar entre ellas.

	Name	Procedure	Nlgeom	Time
✓	Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓	Step-1	Static, General	OFF	1
✓	Step-2	Dynamic, Implicit	OFF	0.0005

Create... Edit... Replace... Rename... Delete... Nlgeom... Dismiss

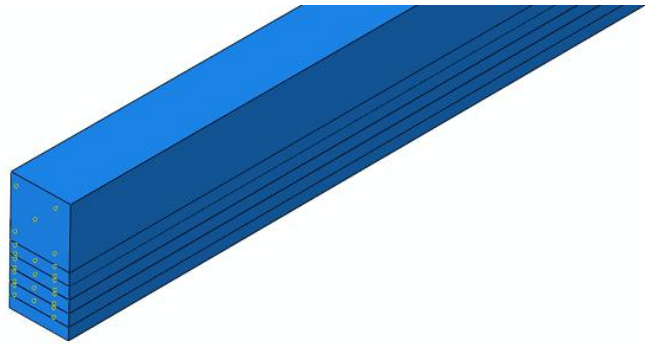
**Figura 3.22:** Definición del análisis realizado

Además, en este mismo módulo se establece el historial de salidas con en que cuenta la simulación, eliminando el cálculo de aquellos parámetros, como los desplazamientos, que sean superfluos para el análisis considerado en el proyecto.

### ➤ Condiciones de contacto

Como se ha mencionado previamente, el modelo se crea mediante el ensamblaje de dos partes idénticas y simétricas, provocando que dicha unión genere la fisura. No obstante se ha de definir el área de la sección fisurada, es decir, se debe seleccionar que parte de la sección se encuentra intacta y que parte pertenece a la fisura.

Para ello se recurre a definir interacciones entre las dos partes que componen la viga. En la zona de la sección fisurada que simula un contacto permanente (como si nunca hubiera habido una partición) se define una condición tipo “TIE”, mientras que la zona que imita a la fisura no se altera. Cabe destacar que se podría definir en la zona que simula a fisura una condición de contacto que impida que una parte penetre con la otra, pero como la viga se encuentra a flexión, la fisura siempre se abrirá y dichas partes nunca penetrarán.



**Figura 3.23:** Área fisurada para  $\alpha = 0.1$

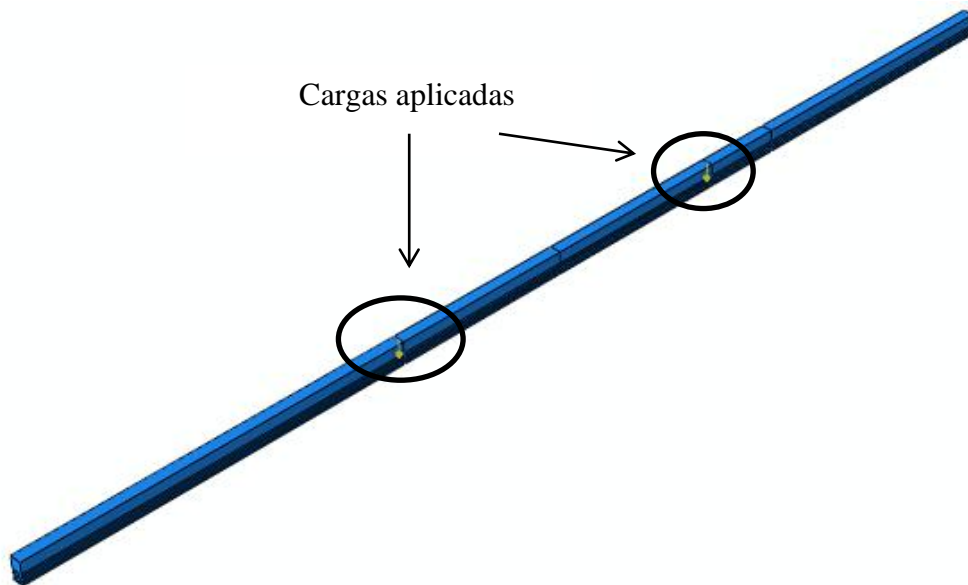
### ➤ Condiciones de contorno

#### ○ *Aplicación de las cargas*

La viga de estudio se encuentra sometida a dos tipos de cargas diferentes:

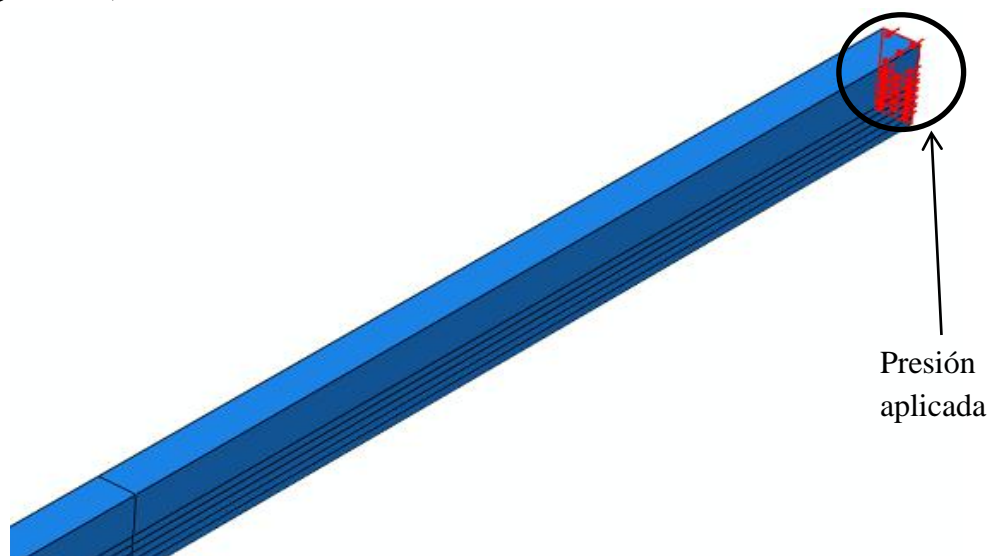
- En el análisis estático la viga soporta dos cargas puntuales de 1 N en sentido negativo del eje Y. Estas cargas están situadas en las posiciones donde se realizaron las particiones durante el proceso de modelado (Figura 3.24).





**Figura 3.24:** Cargas puntuales aplicadas

- En el análisis dinámico, la viga estará sometida a una presión trapezoidal cuyo máximo de amplitud es de  $320 \text{ KPa}$  en el sentido positivo del eje Z (Figura 3.25).

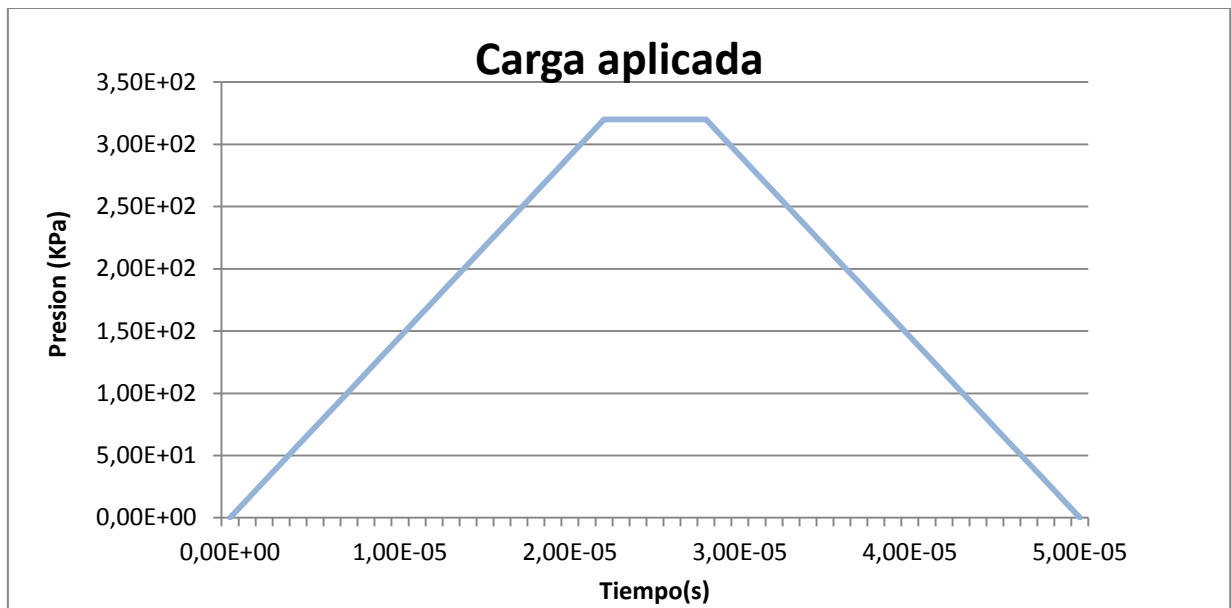


**Figura 3.25:** Sentido de la carga aplicada

La duración de la aplicación de esta presión es de unos  $50 \mu\text{s}$  con un tiempo de subida y bajada de  $22 \mu\text{s}$ . En la tabla 3.2 y la figura 3.26 se detalla más en profundidad las características de esta presión trapezoidal.

Tiempo(s)	Amplitud (KPa)
0	0
$2,2e^{-5}$	320
$2,8e^{-5}$	320
$5e^{-5}$	0

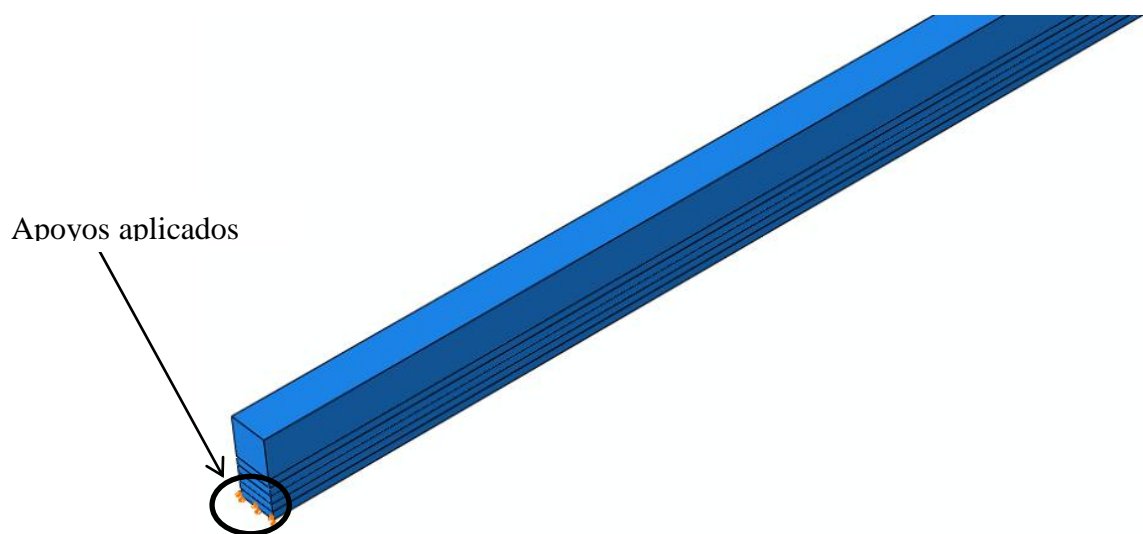
**Tabla 3.2:** Amplitud de la carga aplicada



**Figura 3.26:** Curva de la presión aplicada

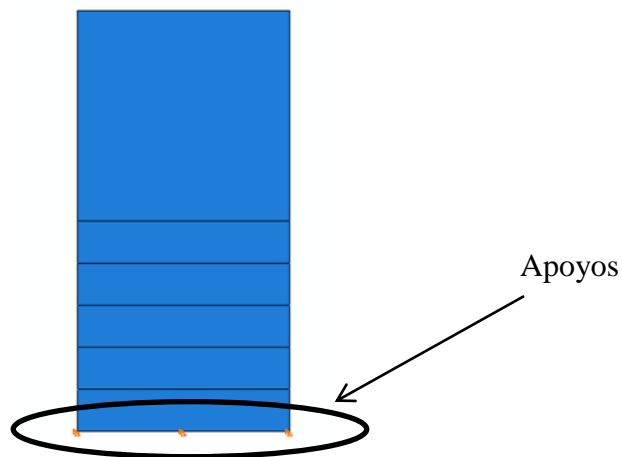
○ *Aplicación de los apoyos*

Por otro lado, la viga modelada se encuentra apoyada por ambos extremos de la misma, mediante sendos carritos, es decir, restringiéndose únicamente el movimiento en la dirección X e Y; y permitiéndose en el eje Z (dirección de propagación de las ondas longitudinales). Estos apoyos afectarán tanto a las cargas puntuales como a la presión, por lo que se mantendrán durante todo el análisis.



**Figura 3.27:** viga con apoyos.

Es importante destacar que los apoyos únicamente estarán aplicadas en la parte inferior de los extremos de la viga, tal y como se considera en la figura 3.28.

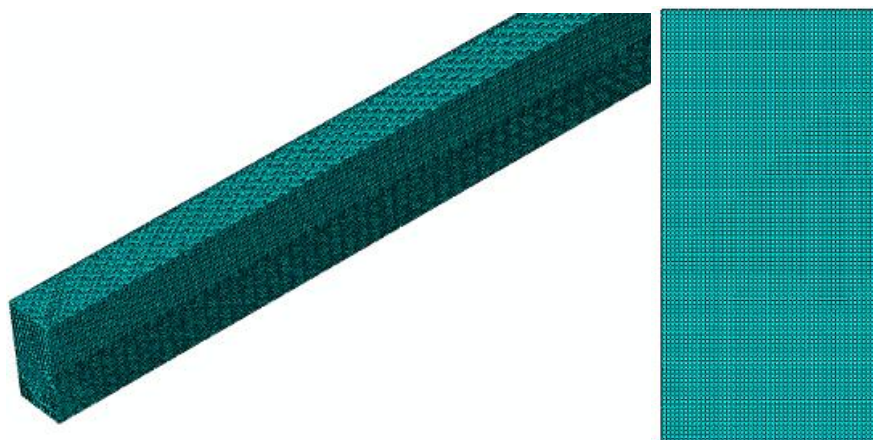


**Figura 3.28:** Detalle de los apoyos de la viga

### ➤ Mallado.

El mallado es el módulo más delicado de todos los presentados, ya que la solución que se obtenga por el método de los elementos finitos dependerá del mallado realizado. Previamente se comentó que el MEF es un método aproximado que se basa en la interpolación de los desplazamientos para obtener la solución del problema planteado. Esta solución se aproximará más a la real cuanto mayor sea el número de elementos utilizados para la discretización del continuo, y por ende, mayor sea la sensibilidad de la malla.

Los elementos empleados en la viga son hexaédricos estructurados. El aspecto del modelo mallado y su sección transversal se pueden apreciar en la siguiente figura 3.29



**Figura 3.29:** Mallado de la viga



# 4

## Resultados y discusión

---

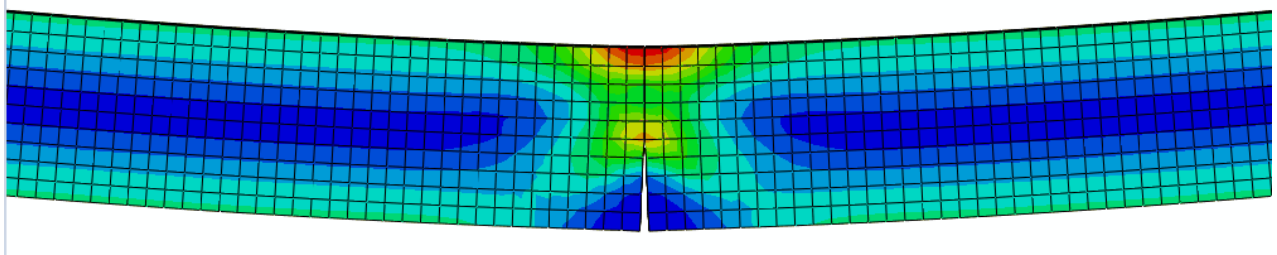
*En el presente capítulo se procederá a la visualización, representación, análisis y posterior discusión de los resultados obtenidos mediante la realización de los dos métodos previamente explicados. Posteriormente se establecerá una comparativa entre las diferencias encontradas cuando a la viga analizada se le dota con una precarga inicial, con respecto a cuándo sobre dicha viga no aparece dicha sollicitación.*

## 4.1 Introducción al análisis de resultados

Para la detección de fisuras en una viga sometida a flexión, el estudio únicamente se ha centrado en el análisis de las tensiones en la dirección del eje Z.

Antes de pasar a estudiar la detección de fisuras mediante la metodología propuesta en el capítulo previo, se ha de corroborar que la simulación de la viga se realiza correctamente. Para ello se visualizarán los resultados diferenciando ente el análisis estático y el dinámico.

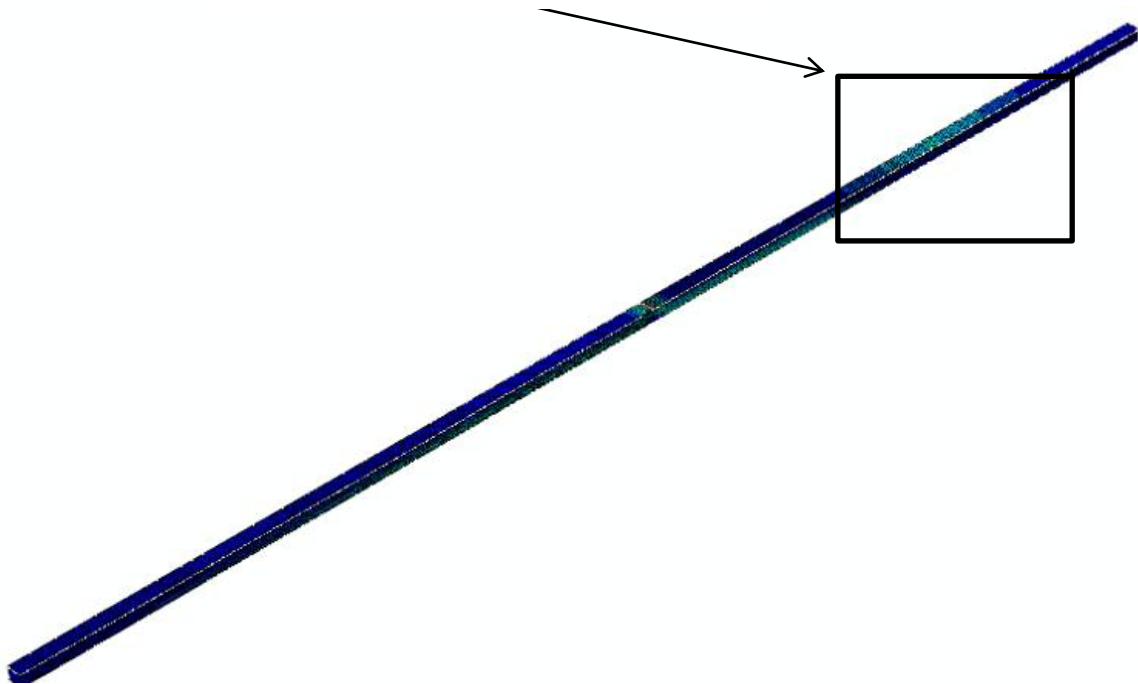
Centrando la atención en la simulación del análisis estático, se observa una apertura de la fisura cada vez mayor conforme transcurre el tiempo, obteniéndose la mayor apertura, y por tanto la mayor tensión sobre la fisura al final del análisis estático. Es importante tener en cuenta que la máxima tensión soportada por la fisura, no supere el límite elástico del material, y, por tanto, que la viga todavía no haya fallado (Figura 4.1).



**Figura 4.1:** Visualización de la fisura abierta.

Una vez conseguida la apertura de la fisura, y por tanto el estado de flexión pura sobre dicha sección, la simulación muestra el análisis dinámico de la viga, donde se puede comprobar que la onda longitudinal de compresión inicial viaja por el interior de la viga, hasta llegar a la fisura donde parte de la misma continua y parte se refleja, y así sucesivamente. La propagación de la onda longitudinal por el interior de la viga se aprecia en la figura 4.2

Propagación onda longitudinal



**Figura 4.2:** Visualización de la onda longitudinal

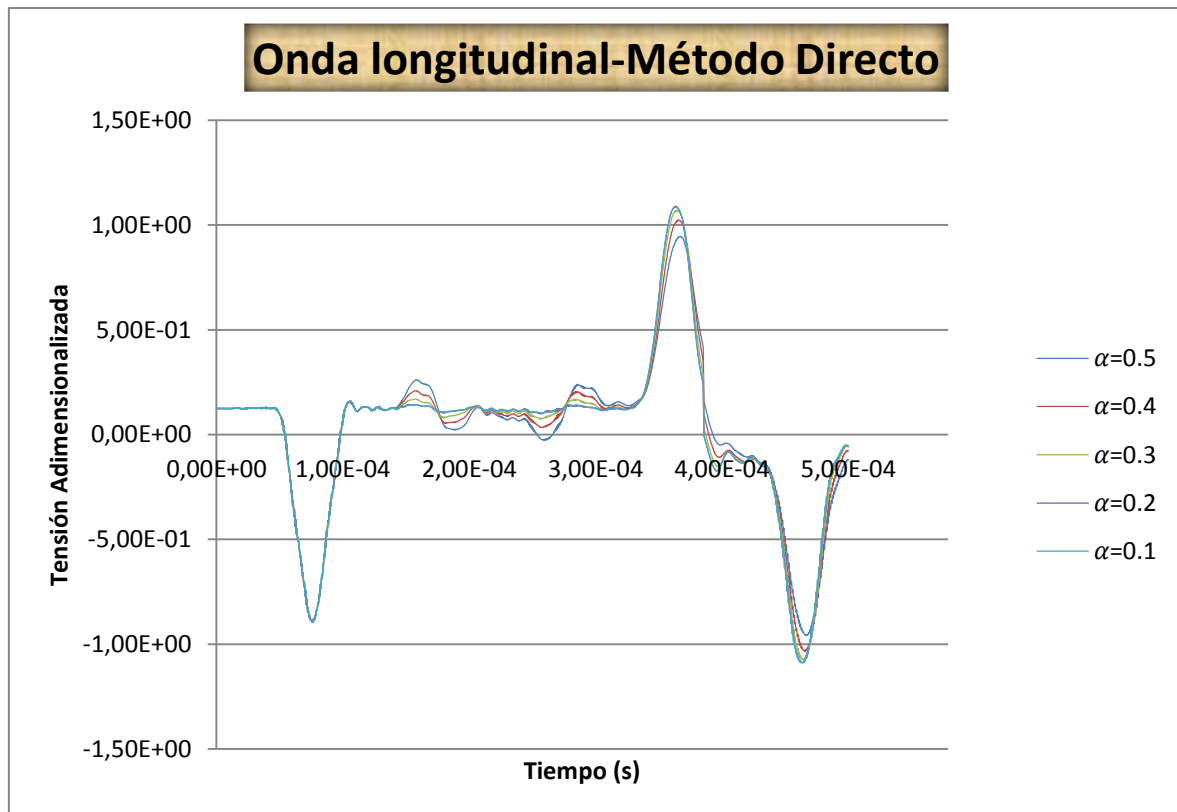
Obtenida la simulación y visualización de la fisura cuando se encuentra sometida a las condiciones de contorno descritas en capítulos previos, en los siguientes apartados se pasa a desarrollar los resultados obtenidos para cada tamaño de fisura de frente recto, discerniendo entre el método directo y el inverso.

## 4.2 Método directo

Como ya se ha discutido en capítulos previos, el método directo permite obtener las señales de propagación de la onda a partir del conocimiento de los parámetros de la fisura, utilizándose estas señales como datos de entrada para la resolución del problema inverso. Por tanto, con este método el estudio se centra en el análisis y tratamiento de las ondas a su paso por la viga fisurada.

### 4.2.1 Resultados y discusión

Las ondas registradas para los cinco tipos de fisuras analizadas se muestran en la figura 4.3. Para un mejor tratamiento de los datos y para facilitar la comparativa entre las distintas señales analizadas, se ha realizado un tratamiento de adimensionalización de las tensiones estudiadas.



**Figura 4.3:** Señales recogidas para diferentes fisuras por el método directo.

A la vista de la figura anterior, se observa que las tensiones registradas por el sensor se encuentran desfasadas con respecto al eje horizontal, como consecuencia de la precarga inicial que afecta a toda la viga, provocando un aumento en la tensión soportada por la misma. Con el fin de facilitar el estudio de los parámetros característicos de las ondas, se ha realizado un desplazamiento de las señales centrándolas con respecto al origen de coordenadas, de manera que las tensiones de tracción y compresión máximas registradas por el sensor en cada punto varían, pero no las amplitudes y áreas que presentan dichas señales registradas, que es lo que verdaderamente se persigue calcular. En la figura 4.4 se muestran las señales registradas cuando al sensor se le ha eliminado la precarga inicial.



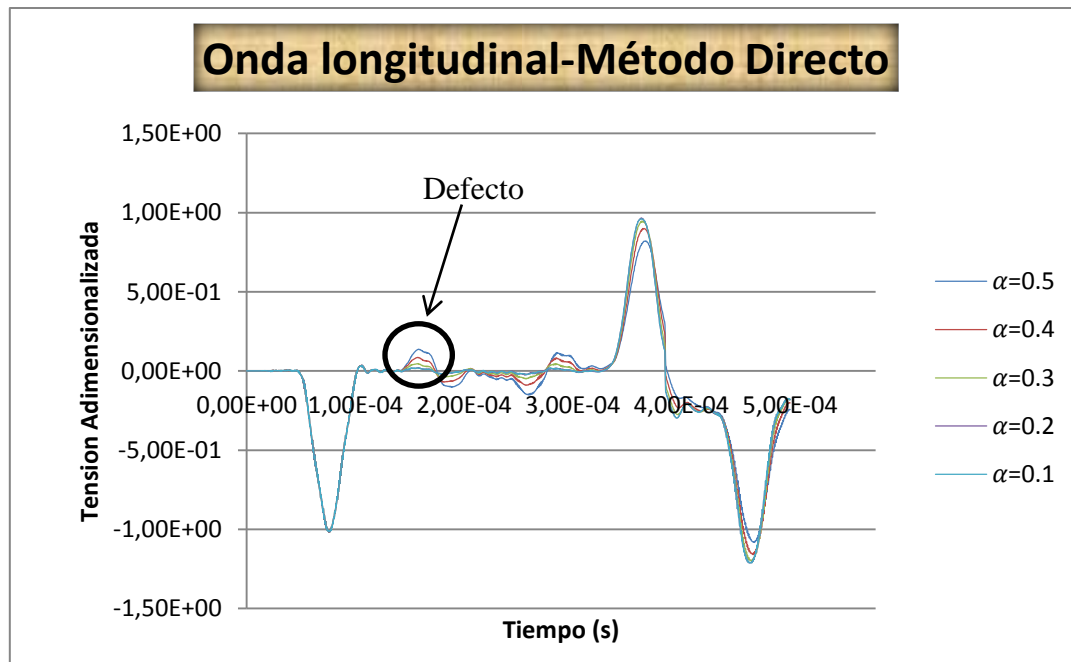


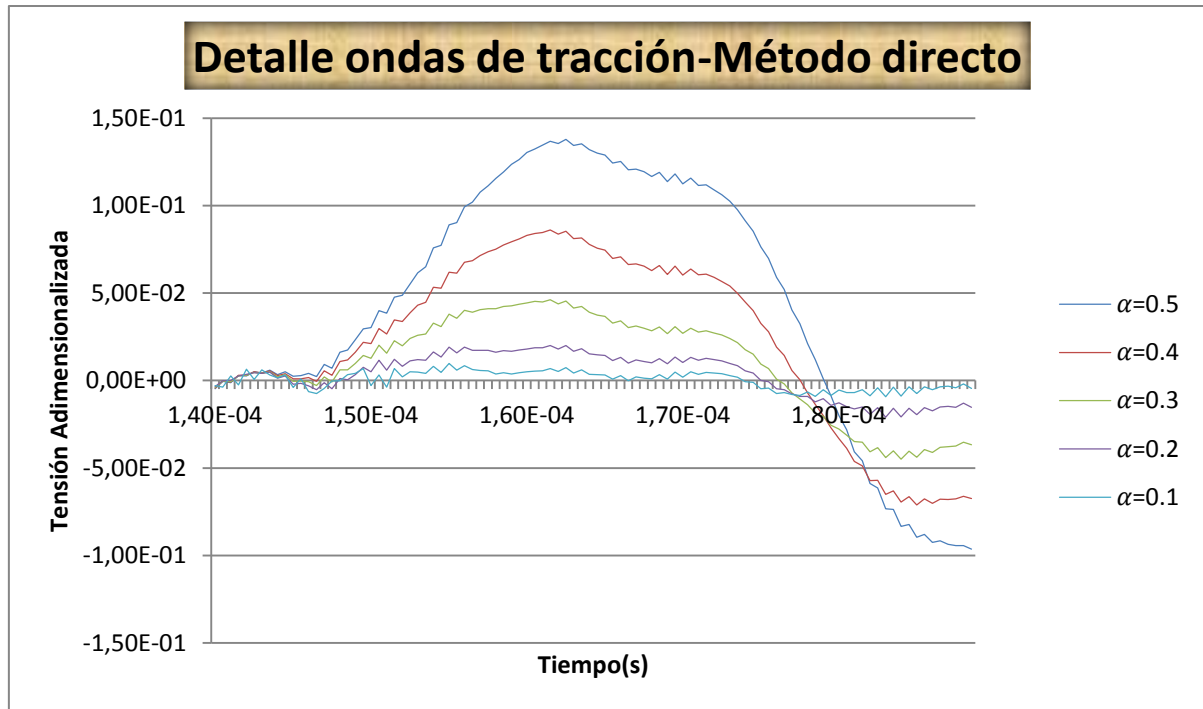
Figura 4.4: Señales desplazadas para diferentes fisuras

Como se puede apreciar en la 4.4, todos los pulsos incidentes de compresión se propagan por la viga con la misma amplitud, hasta alcanzar el límite de la misma donde se reflejan como ondas de tracción con una amplitud ligeramente inferior, presentando, además, cada uno de las ondas registradas una diferente amplitud en función de la fisura analizada.

Entre la detección por parte de la banda extensométrica de la onda de compresión y su respectivo reflejo de tracción al final de la viga, el sensor detecta una onda de mucha menor amplitud que la onda principal, lo que indica la posible presencia de un defecto en el interior del elemento analizado.

Estas ondas de pequeña amplitud que regresan al punto de impacto como ondas de tracción, explican el motivo por el cual la onda inicial viajera cuando choca con la frontera de la viga regresa con una amplitud menor, ya que la presencia del defecto provoca una atenuación en la misma.

Puesto que las ondas de tracción, situadas a  $140\ \mu\text{s}$  de la sección correspondiente al impacto inicial, son las generadas por la sección fisurada, el estudio mediante el método directo se centra en el análisis de las características de esta onda para cada fisura de frente recto ensayado, pudiéndose observar con más detalle estas ondas reflejadas en la figura 4.5.



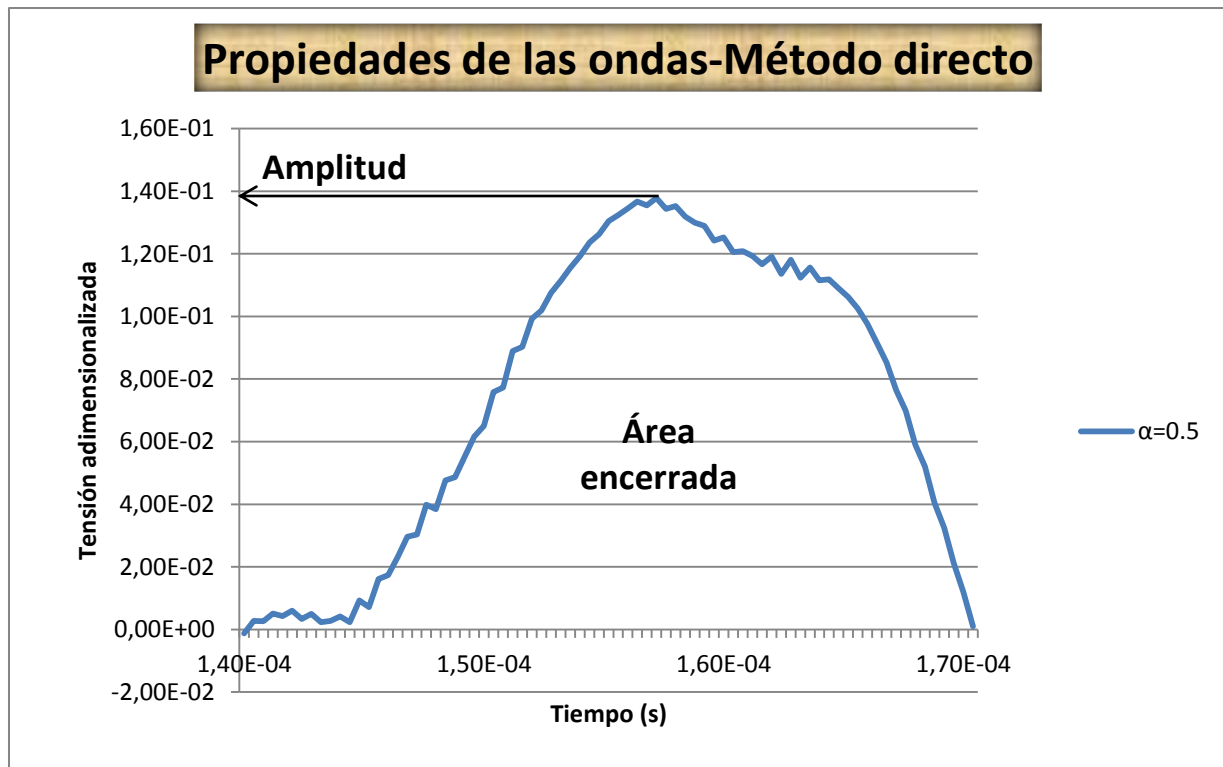
**Figura 4.5:** Detalle de las ondas reflejadas en la sección fisurada.

En la figura 4.5 se observan como todas las ondas de tracción comienzan en el mismo periodo de tiempo ( $140 \mu s$ ) y finalizan casi aproximadamente en el mismo periodo de tiempo ( $180 \mu s$ ). Es importante resaltar que este no es el periodo de tiempo que transcurre desde que la onda inicial llega a la fisura, sino el periodo de tiempo comprendido entre el recorrido de la onda inicial de compresión hasta la fisura y el recorrido de la onda de tracción hasta llegar al sensor. Como conocemos la posición de la fisura, podemos aplicar la ecuación (3.4) para obtener esa distancia recorrida

$$v = \frac{e}{t} \rightarrow e = v * t = 5172 \text{ m/s} * 140e^{-6} = 0.732 \text{ metros} \approx 0.74 \text{ metros}$$

Obteniendo que, efectivamente, en ese periodo de tiempo la onda ha recorrido aproximadamente 0.74 metros de distancia.

Del análisis de las ondas de tracción también se aprecia que la onda de mayor amplitud corresponde con el ensayo en el que la viga presenta el mayor factor de fisura ( $\alpha = 0.5$ ), y dicha amplitud, y por tanto el área encerrada bajo la misma, disminuye conforme se disminuye la profundidad de la misma, lo que hace indicar que existe una relación entre las características de la onda y las características de la fisura. Para obtener esta relación, en primer lugar, se extraen los parámetros de cada una de las ondas de la figura 4.5. Cabe destacar que, mientras que para hallar el área encerrada es necesario recurrir a la integración numérica y utilizar el teorema del trapecio, la amplitud se puede obtener directamente a partir de la representación de la onda, como se muestra en el ejemplo de la figura 4.6.



**Figura 4.6:** Obtención de propiedades de las ondas.

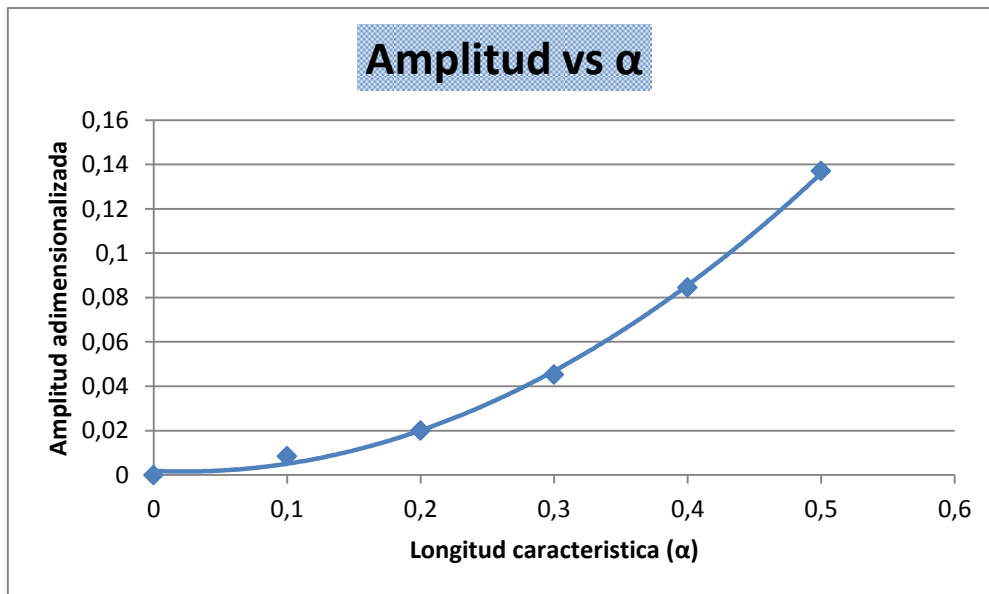
Los valores obtenidos de las propiedades de las ondas estudiadas para las fisuras ensayadas se muestran en la tabla 4.1.

	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.4$	$\alpha = 0.5$
Área encerrada	$1.04 e^{-7}$	$3.59 e^{-7}$	$8.63 e^{-7}$	$1.662 e^{-6}$	$2.73 e^{-6}$
Amplitud	$8.47 e^{-3}$	0.02	0.0453	0.0846	0.137

**Tabla 4.1:** Valores de las propiedades de la onda en función de la fisura.

En función de los datos de la tabla 4.1, es posible construir dos gráficas que permitirán establecer la relación existente entre las propiedades de la onda de tracción reflejada (amplitud y área) con respecto a la longitud característica de la fisura.

En la figura 4.7 se muestra la relación existente entre la amplitud de la onda y la profundidad de la fisura, mediante un ajuste polinómico de segundo grado, para los cinco ensayos realizados.



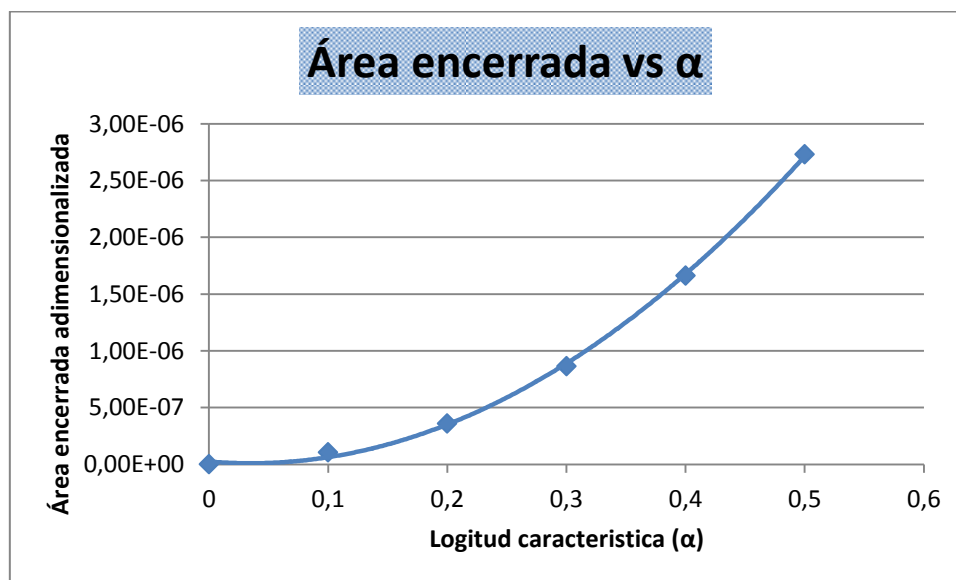
**Figura 4.7:** Amplitud en función de la profundidad de la fisura.

Obteniéndose, tras el ajuste de los datos obtenidos, la ecuación:

$$\text{Amplitud} = 0.5703\alpha^2 - 0.0137\alpha \quad (4.1)$$

Para un factor de ajuste de la curva de:  $R^2 = 0.9983$

Seguidamente, se establece la relación existente entre el área encerrada bajo la curva de la onda y la profundidad de la fisura, como se parecía en la figura 4.8



**Figura 4.8:** Área bajo la curva en función de la profundidad de la fisura.

Obteniéndose, para esta segunda grafica la siguiente ecuación polinómica:

$$\text{Área} = 1e^{-5}\alpha^2 - 7e^{-7}\alpha \quad (4.2)$$

Con un coeficiente de ajuste de  $R^2 = 0.9993$

A la vista de las dos figuras anteriores se puede afirmar que tanto la amplitud como el área relativa de las ondas reflejadas en la fisura se incrementan conforme aumenta la profundidad de la fisura.

También cabe destacar, que las gráficas de las figuras 4.7 y 4.8, así como sus ajustes polinómicos son los mismos que se obtendrían para cualquier otro valor de la sollicitación, puesto que una mayor carga aplicada lo único que provoca es que la onda inicial de tensión sufra un desfase mayor, pero la onda de tracción reflejada tendrá la misma amplitud y el mismo área, independientemente del valor de la carga concentrada. Por ello, estas gráficas serán aplicables a cualquier viga que se encuentre solicitada sin tener en cuenta el valor de la carga a la que esté sometida.

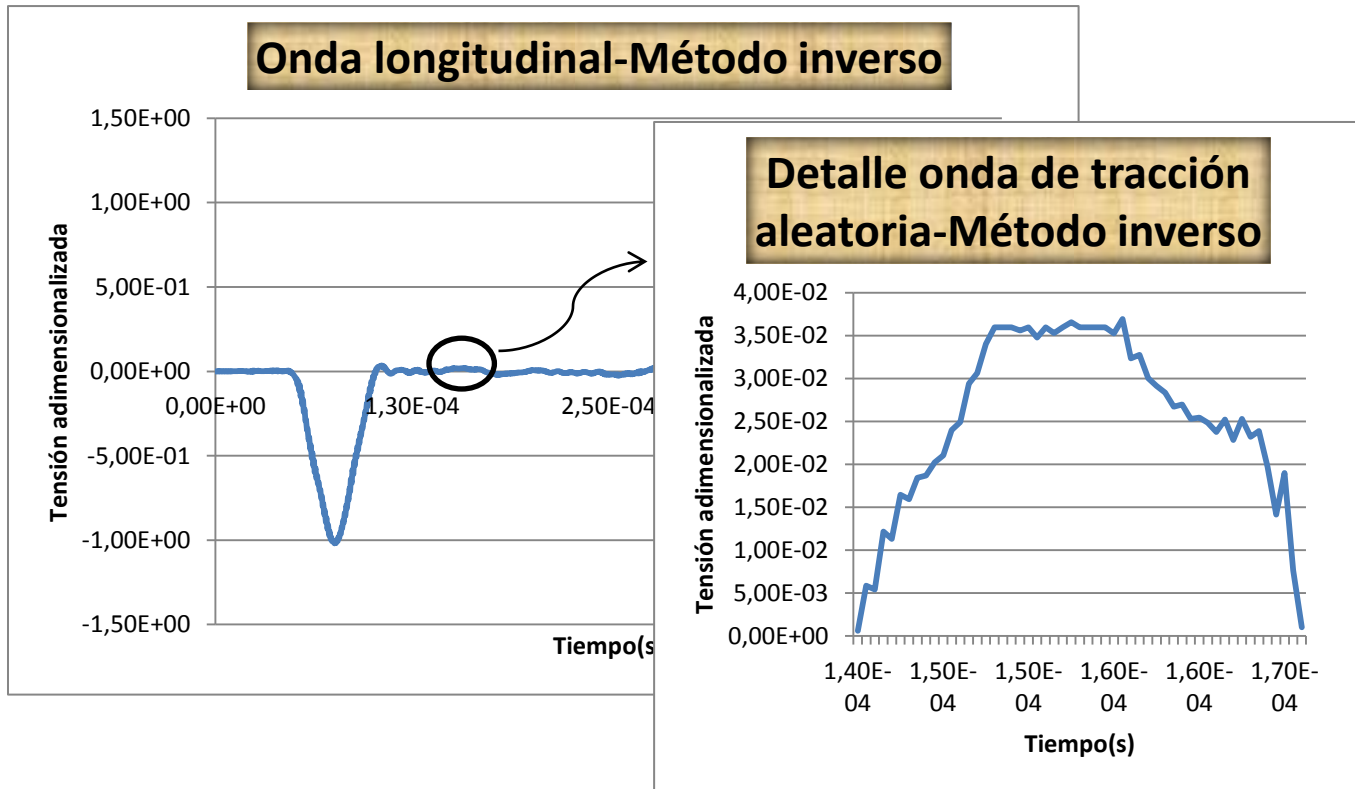
En el estudio mediante el método directo, se ha obtenido la máxima amplitud para  $\alpha = 0.5$ , siendo esta de 0.137; y la mínima se alcanzó para  $\alpha = 0.1$ , mostrando esta una amplitud de  $8.47 e^{-3}$ , siendo la diferencia entre las dos amplitudes registradas de aproximadamente dos órdenes de magnitud de diferencia. En cuanto al área encerrada, se obtiene la misma conclusión que para el análisis de la amplitud, el máximo área de la onda reflectada se obtiene cuando la profundidad es la máxima, en este caso  $\alpha = 0.5$  ( $2.73 e^{-6}$ ), y el menor área cuando la profundidad es de  $\alpha = 0.1$ , siendo en este último caso el área encerrada de  $1.04 e^{-7}$ . Por último, es reseñable, que la diferencia entre las amplitudes máxima y mínima obtenidas es de dos órdenes de magnitud, mientras que el área obtenido para la longitud característica máxima y para la mínima difiere tan solo de un orden de magnitud, pudiendo concluir que el aumento de la profundidad de la fisura provoca cambios más significativos en las amplitudes de las ondas de tracción reflejadas que en las áreas que estas ondas encierran.

## 4.3 Método inverso

Demostrada la relación existente entre los parámetros característicos de la fisura y los de la onda longitudinal, se pasa a resolver el problema inverso mediante el cual se permite identificar y caracterizar cualquier fisura, a partir de la representación de cualquier onda de tensión. Para demostrar este método se parte de una onda cualquiera, mediante la cual se hallarán todos los parámetros relativos a las características de la fisura.

### 4.3.1 Resultados y discusión

La onda empleada para explicar este método presenta la forma de la figura 4.9, que se corresponde con una fisura de  $\alpha = 0.25$  y  $L_{Fisura} = 0.5$ , distinta de las utilizadas anteriormente para obtener las expresiones y gráficas del área y de la amplitud.



**Figura 4.9:** Representación onda general aleatoria. Método inverso

A partir de la señal 4.9 de la cual se desconocen todos los datos, se observa que existen unas ondas de tracción y compresión de menor amplitud que el pulso inicial, lo que indica la presencia de un defecto.

Observando en detalle la onda longitudinal es posible afirmar que la onda de tracción comienza a los  $140\mu s$ , aproximadamente, por lo que aplicando la ecuación (3.4), es posible obtener la localización exacta de la fisura en la viga.

$$e = v * t = 5172 \text{ m/s} * 140e^{-6} = 0.72408 \text{ metros}$$

No obstante, como ya se ha explicado previamente, esta no es la posición de la fisura, sino el espacio recorrido por la onda hasta alcanzar el sensor. Como el sensor se halla a 0,26 metros del punto de inicio, se obtiene que la fisura se encuentra en:

$$e = 0.72408 \text{ m} = L_{fisura} + (L_{fisura} - 0.26) \rightarrow L_{fisura} = 0.49204 \text{ metros}$$

Por tanto, se puede afirmar que la fisura se encuentra a una distancia 0.49204 metros del punto de impacto inicial, con un error porcentual en valor absoluto de:

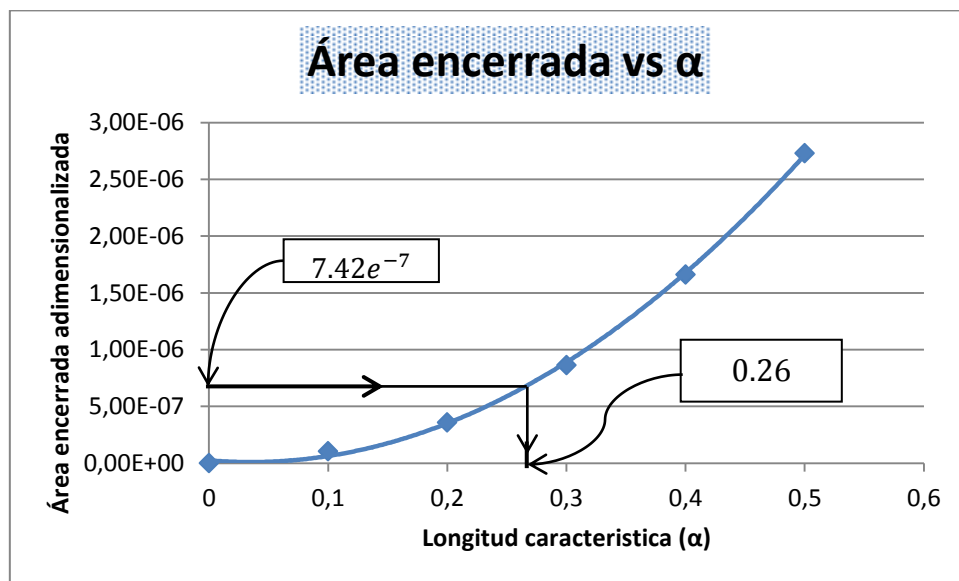
$$\varepsilon(\%) = \frac{0.5 - 0.49204}{0.5} * 100 = 1.5\%$$

Seguidamente, es necesario determinar la profundidad que presenta la fisura. Para ello, en primer lugar, para la onda representada en la figura 4.9 se calculan los valores relativos a su amplitud y a su área encerrada, obteniéndose:

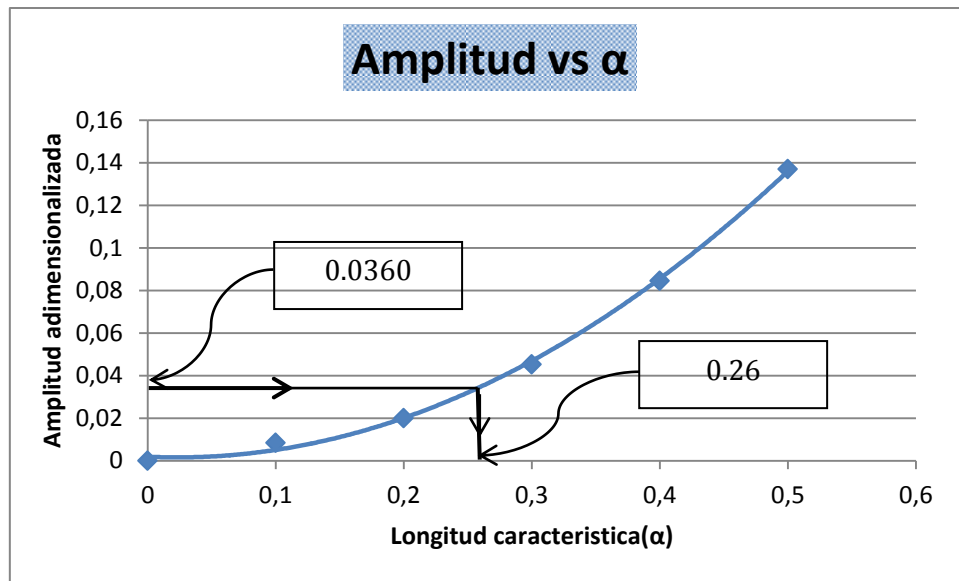
$$Amplitud = 0.0360$$

$$Área = 7.42e^{-7}$$

Finalmente, introduciendo estos valores en las figuras 4.7 ó 4.8, o entrando en las expresiones polinómicas (4.1) ó (4.2) se obtiene un valor aproximado de la longitud característica de la fisura presente en la viga estudiada.



**Figura 4.10:** Procedimiento de obtención de  $\alpha$  por el criterio de las áreas



**Figura 4.11:** Procedimiento de obtención de  $\alpha$  por el criterio de las amplitudes

Obteniéndose, tanto para la gráfica que representa la amplitud en función de la longitud característica de la fisura, como para la que representa el área en función de dicha longitud un valor estimado de:

$$\alpha = 0.26$$

Con un error porcentual del:

$$\varepsilon(\%) = \frac{0.25 - 0.26}{0.25} * 100 = 4\%$$

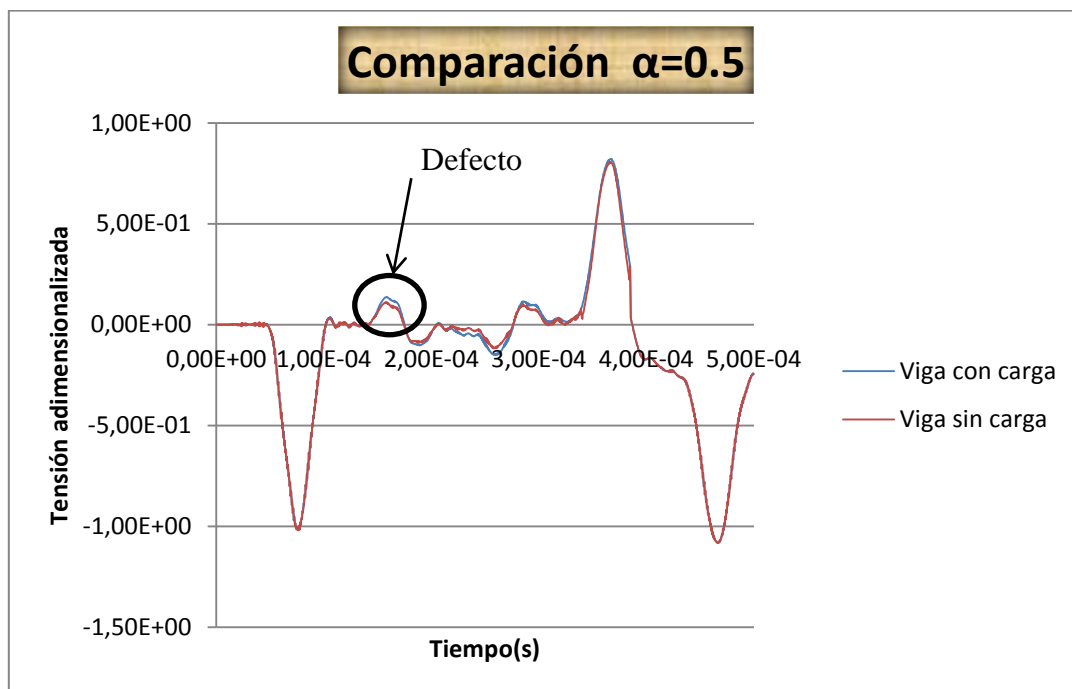
A la vista de los resultados, se puede afirmar que el método inverso es una técnica muy potente para caracterizar una fisura a partir de una onda cualquiera, y del conocimiento de las relaciones presentes entre la onda y la fisura.

Los resultados conseguidos señalan que mediante el empleo de esta técnica no destructiva se ha obtenido la posición de la fisura con un error porcentual de apenas el 1.5%, mientras que la estimación de la longitud característica de la fisura se ha realizado con un error porcentual del 4%, error más amplio que el anterior puesto que la obtención de la longitud característica se ha llevado a cabo mediante estimaciones y ajustes, por lo que su obtención está ligada a errores de aproximación.

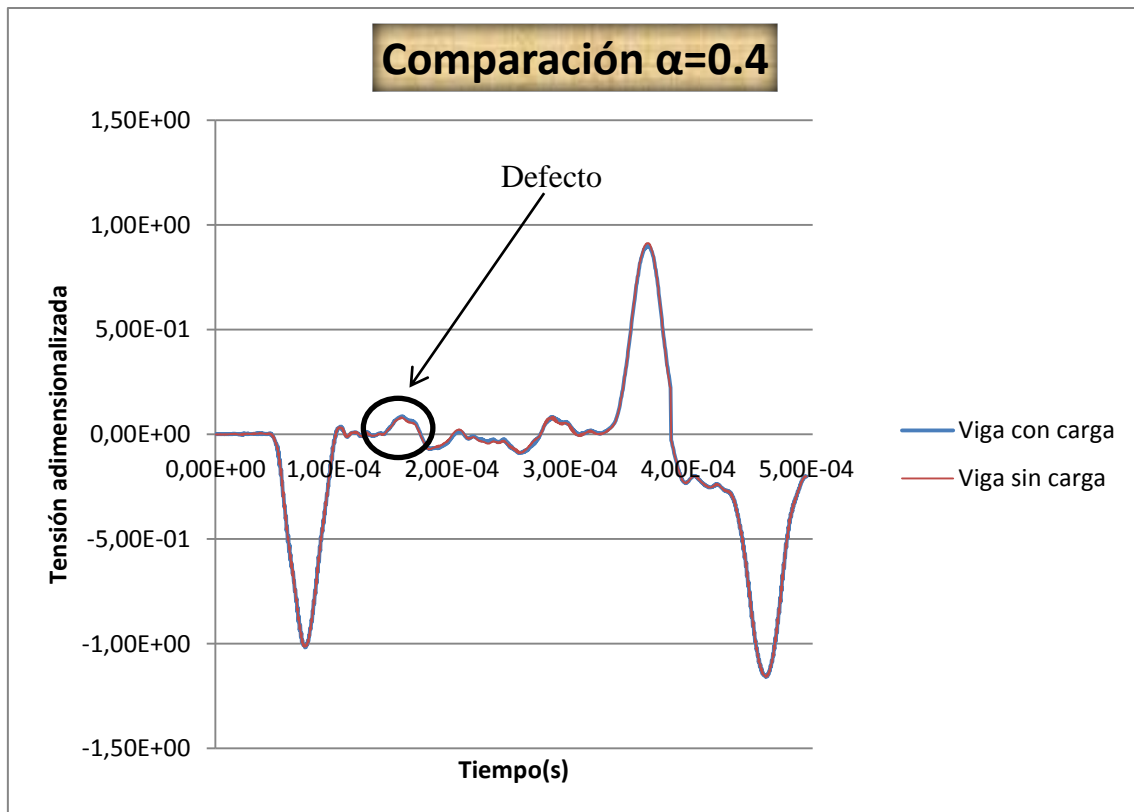


## 4.4 Influencia de la sollicitación a flexión

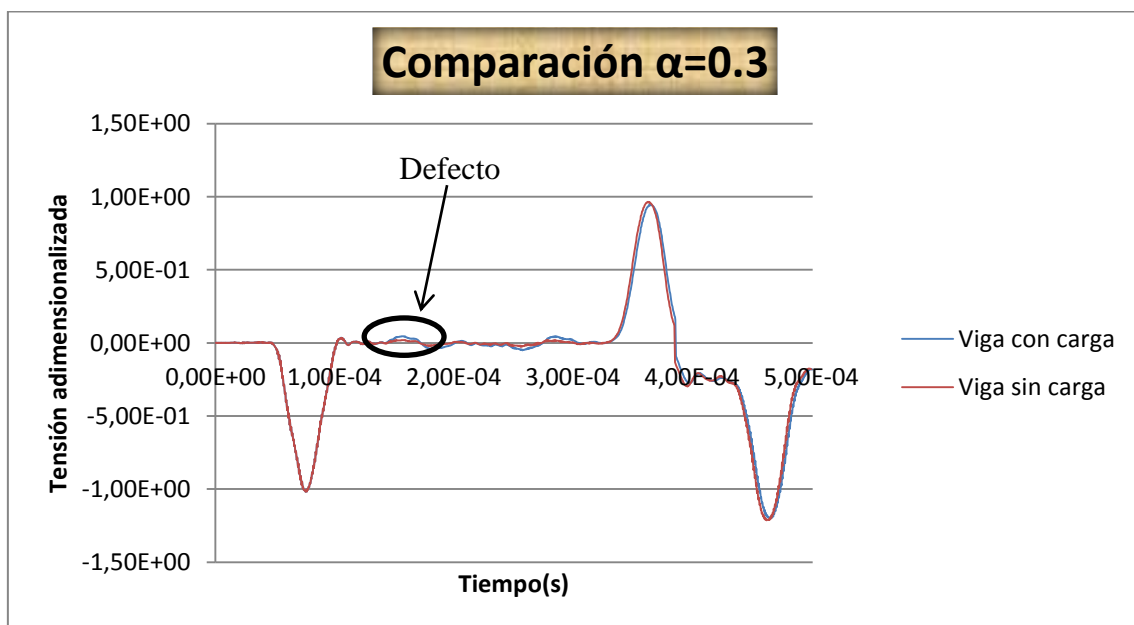
Para finalizar el presente capítulo se va a llevar a cabo una comparativa entre una viga fisurada sometida a cargas puntuales, y otra libre de dicha sollicitación, con el fin de determinar la influencia de estas cargas concentradas en el análisis de la fisura. Para realizar la comparación, y con vistas en no caer en la redundancia, tan sólo se analizan las vigas que presenten fisuras de frente recto con una longitud característica de  $\alpha = 0.3$ ,  $\alpha = 0.4$  y  $\alpha = 0.5$ , donde la diferencia entre una fisura solicitada y otra sin solicitar es más plausible que si se utilizaran profundidades de fisuras menores. Las comparaciones entre una viga solicitada y otra sin solicitar para estas longitudes características de fisura, se muestran en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14.



**Figura 4.12:** Comparación para una longitud característica de  $\alpha = 0.5$

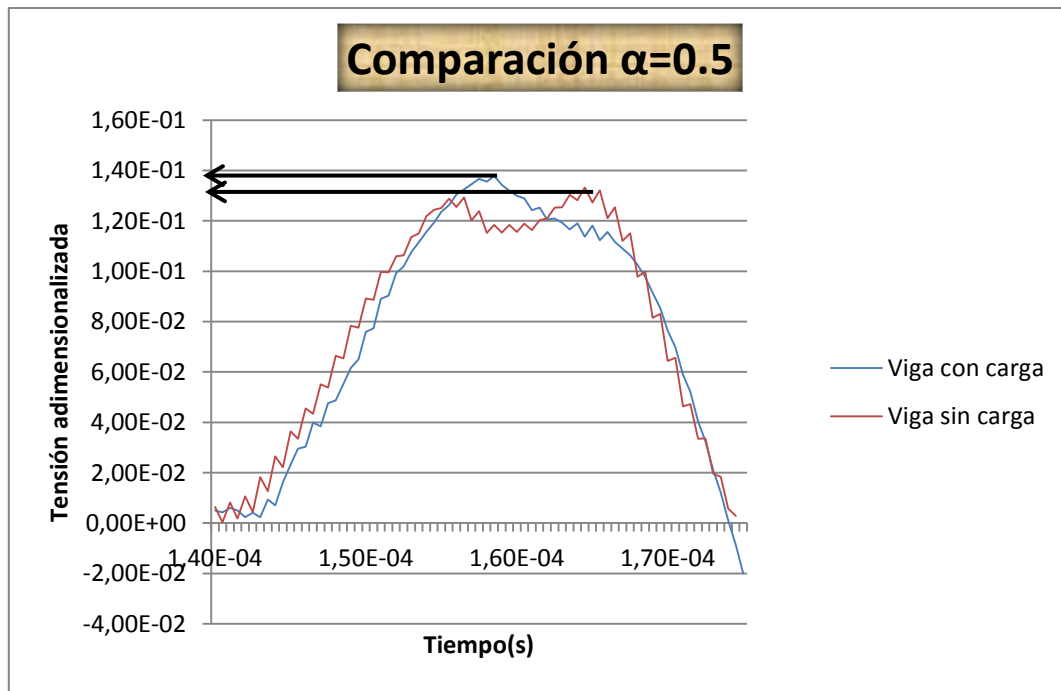


**Figura 4.13:** Comparación para una longitud característica de  $\alpha = 0.4$



**Figura 4.14:** Comparación para una longitud característica de  $\alpha = 0.3$

Aunque la diferencia en estas señales parece ser nula, si se observan las ondas de tracción en la sección fisurada con más detalle se podrán notar ciertas diferencias. El detalle de la onda de tracción correspondiente a la fisura de longitud característica  $\alpha = 0.5$  se muestra en la figura 4.15.



**Figura 4.15:** Detalle de la comparación de las ondas de tracción para  $\alpha = 0.5$

En la figura 4.15 se recoge la comparación cuando dos vigas idénticas se analizan con y sin sollicitación previa. Se puede comprobar a simple vista como la onda de tracción reflejada en la fisura abierta presenta una mayor amplitud respecto a onda obtenida con la fisura cerrada. Además, el área obtenida para ambos casos es también ligeramente superior con la fisura abierta (aunque cabe reseñar que la diferencia en el área es casi inapreciable, ya que como se ha expuesto en apartados previos el parámetro que mayor varía cuando existe una fisura es la amplitud). Este aumento en los parámetros pertenecientes a la señal con la viga cargada con respecto a la viga descargada, se deben, fundamentalmente, a que cuando se somete la viga a una carga previa, de tal forma que la sección fisurada se encuentre en un estado de flexión pura, la fisura se abre provocando que la tensión previa al impacto en la sección fisurada sea mayor que la que había cuando la viga no estaba cargada.

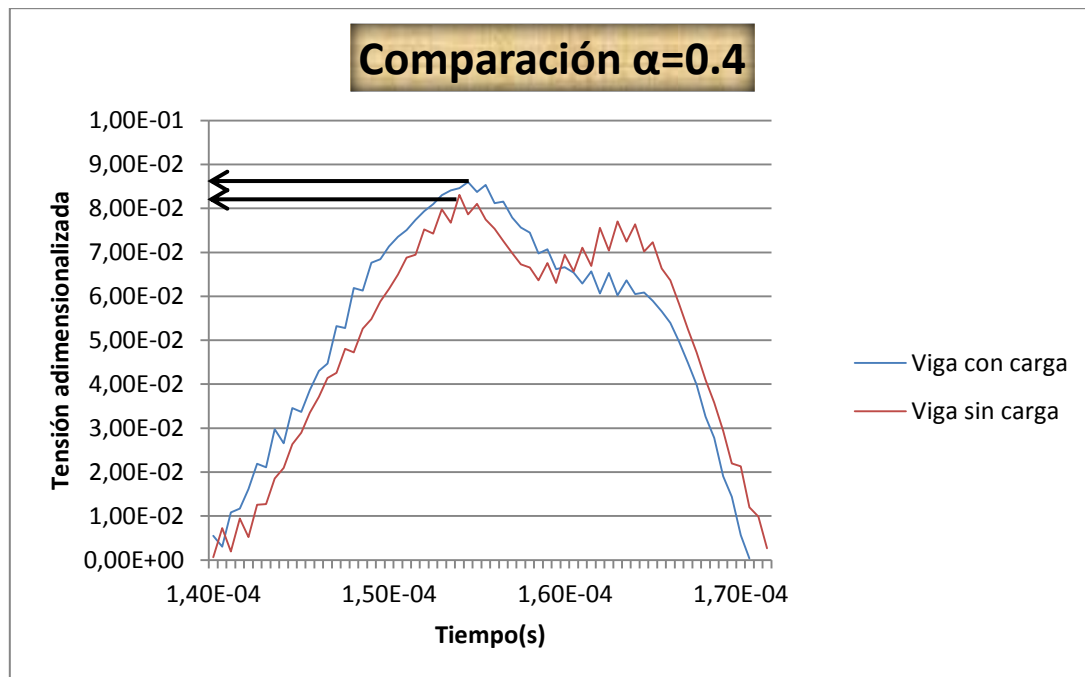
Los datos obtenidos del área y la amplitud se recogen en la tabla 4.2.

$\alpha = 0.5$	Con carga	Sin carga
Área encerrada	$2.73 e^{-6}$	$2.67 e^{-6}$
Amplitud	0.137	0.127

**Tabla 4.2:** Valores de las propiedades de la onda en función de la sollicitación para  $\alpha = 0.5$

A la vista de la tabla 4.2, podemos concluir que la sollicitación previa provoca un aumento en la onda de tracción. Para una fisura de frente recto de longitud característica  $\alpha = 0.5$ , la señal de tracción presenta una amplitud y un área encerrada un 7% y un 2,2% mayor, respectivamente, con respecto a la amplitud y al área encerrada de la onda generada para la misma longitud característica, pero sin sollicitación previa.

Continuando con el análisis, para una longitud característica de fisura de  $\alpha = 0.4$ , se han obtenido las ondas de tracción presentes en la figura 4.16.



**Figura 4.16:** Detalle de la comparación de las ondas de tracción para  $\alpha = 0.4$

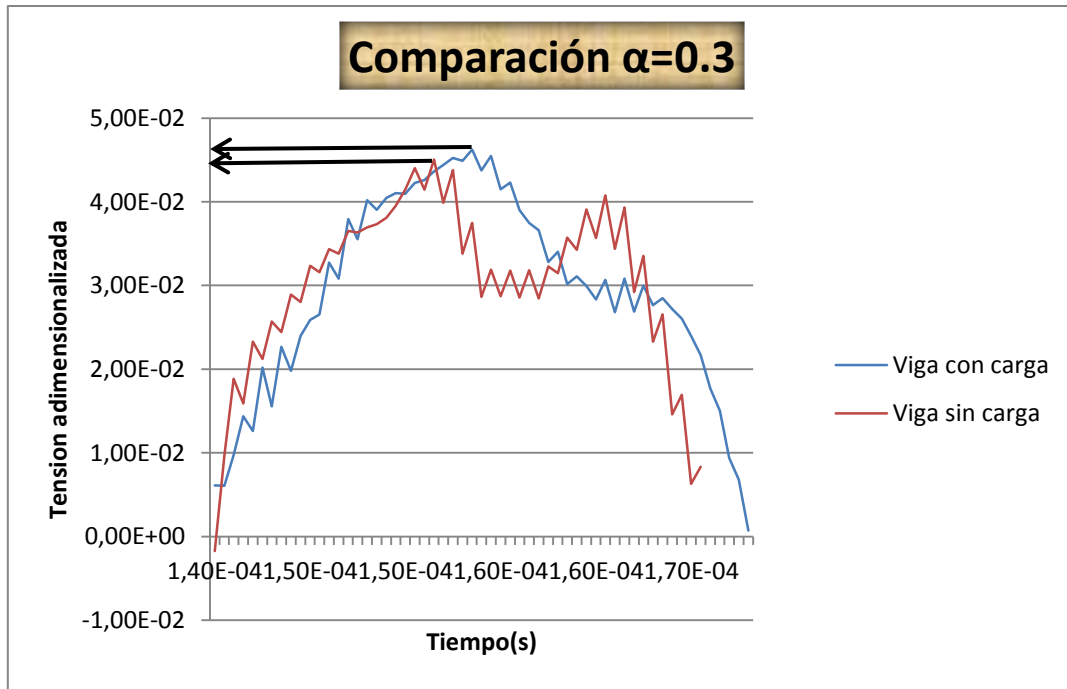
En este caso, como en el anterior, la amplitud, al igual que el área, pero este en menor medida, aumenta cuando se somete la viga fisurada a una solicitación previa. Los datos recogidos de la amplitud y el área bajo la curva de las ondas de tracción correspondientes a una longitud característica de  $\alpha = 0.4$  son los recogidos en la tabla 4.3.

$\alpha = 0.4$	Con carga	Sin carga
Área encerrada	$1.662e^{-6}$	$1.63e^{-6}$
Amplitud	0.0846	0.0830

**Tabla 4.3:** Valores de las propiedades de la onda en función de la solicitación para  $\alpha = 0.4$

A partir de la figura 4.16 y de la tabla 4.3 se puede corroborar que tanto la amplitud como el área continúan siendo mayores cuando la viga se encuentra solicitada. En concreto la amplitud de la onda de tracción correspondiente a la sección fisurada sometida a flexión es un 1,92% mayor que cuando la sección fisurada se encuentra en reposo, mientras que el área encerrada bajo dicha señal de tracción presenta un aumento del 1.96% con respecto a la señal perteneciente a la viga sin solicitar.

Por último, el detalle de las ondas de tracción de una viga cargada y otra sin cargar, correspondientes a la longitud característica de  $\alpha = 0.3$ , se encuentra en la figura 4.17.



**Figura 4.17:** Detalle de la comparación de las ondas de tracción para  $\alpha = 0.3$

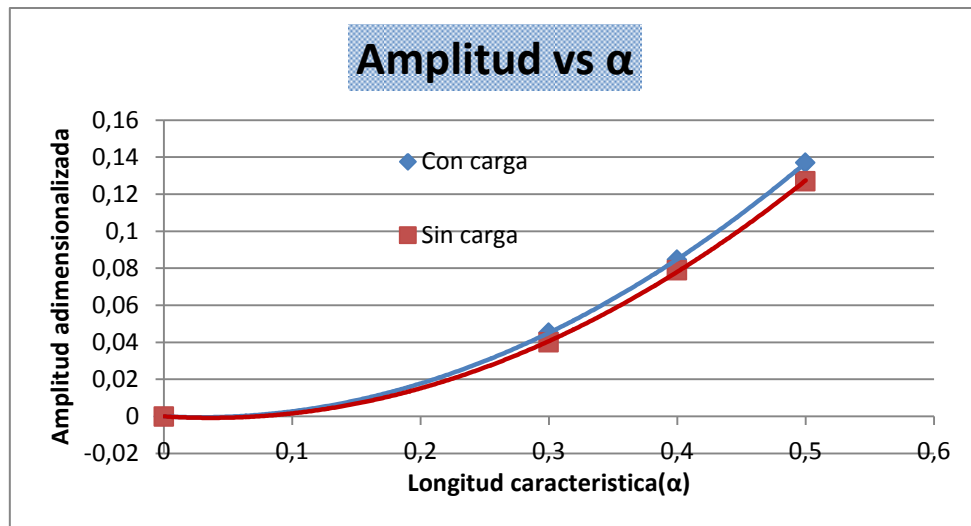
De la figura 4.17 se pueden extraer los datos de las amplitudes y áreas encerradas para ambos estudios, que son recogidos en tabla 4.4

$\alpha = 0.3$	Con carga	Sin carga
Área encerrada	$8.63e^{-7}$	$7.97e^{-7}$
Amplitud	0.0453	0.0450

**Tabla 4.4:** Valores de las propiedades de la onda en función de la sollicitación para  $\alpha = 0.3$

Analizando la tabla 4.4, obtenemos para la onda perturbada unas amplitudes y áreas encerradas muy parejas entre sí, siendo mayores cuando la viga se encuentra sometida a cargas concentradas. Este aumento, es menos significativo que cuando la fisura tiene una longitud característica de  $\alpha = 0.4$  o  $\alpha = 0.5$ , pero aun así apreciable a simple vista. En concreto la amplitud y el área de la onda perturbada en una viga solicitada para una longitud característica de  $\alpha = 0.3$  son un 0.6% y un 8.2% mayores, respectivamente, con respecto a una viga sin estar sometida a flexión.

Comparando la relación existente entre la amplitud de las ondas de tracción reflejadas para las distintas longitudes características estudiadas, se obtienen dos curvas polinómicas como las que se muestran en la figura 4.18.



**Figura 4.18:** Comparación de las amplitudes entre una viga solicitada y otra sin solicitar

Obteniéndose, tras el ajuste de los datos obtenidos mediante polinomios de segundo grado:

- Para la viga solicitada:

$$\text{Amplitud} = 0.6168 \alpha^2 - 0.0346\alpha \quad (4.3)$$

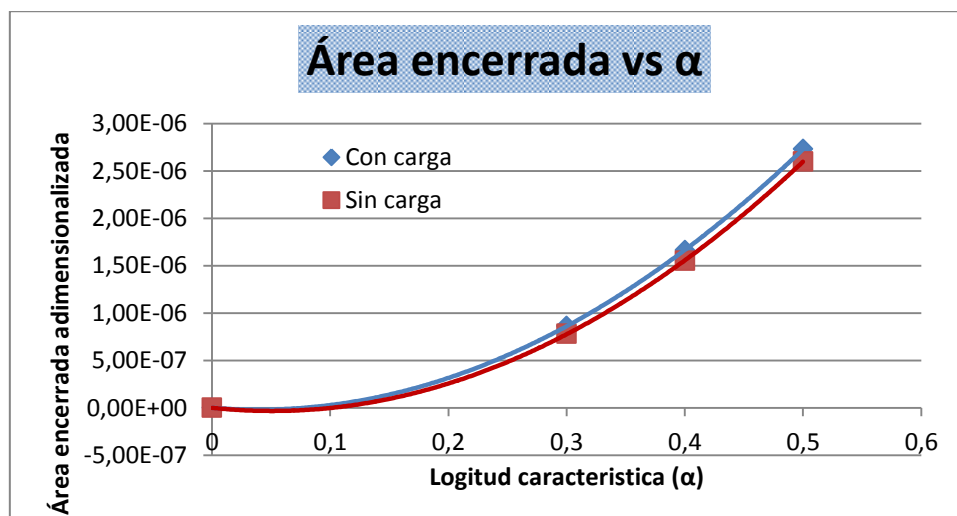
Para un factor de ajuste de la curva de:  $R^2 = 1$

- Para la viga sin solicitar:

$$\text{Amplitud} = 0.5965 \alpha^2 - 0.0435\alpha \quad (4.4)$$

Para un factor de ajuste de la curva de:  $R^2 = 0.9998$

Comparando la relación entre las áreas que presentan las ondas de tracción reflejadas con respecto a las longitudes características estudiadas, se obtienen las curvas expuestas en la figura 4.19.



**Figura 4.19:** Comparación de las áreas encerradas entre una viga solicitada y otra sin solicitar.

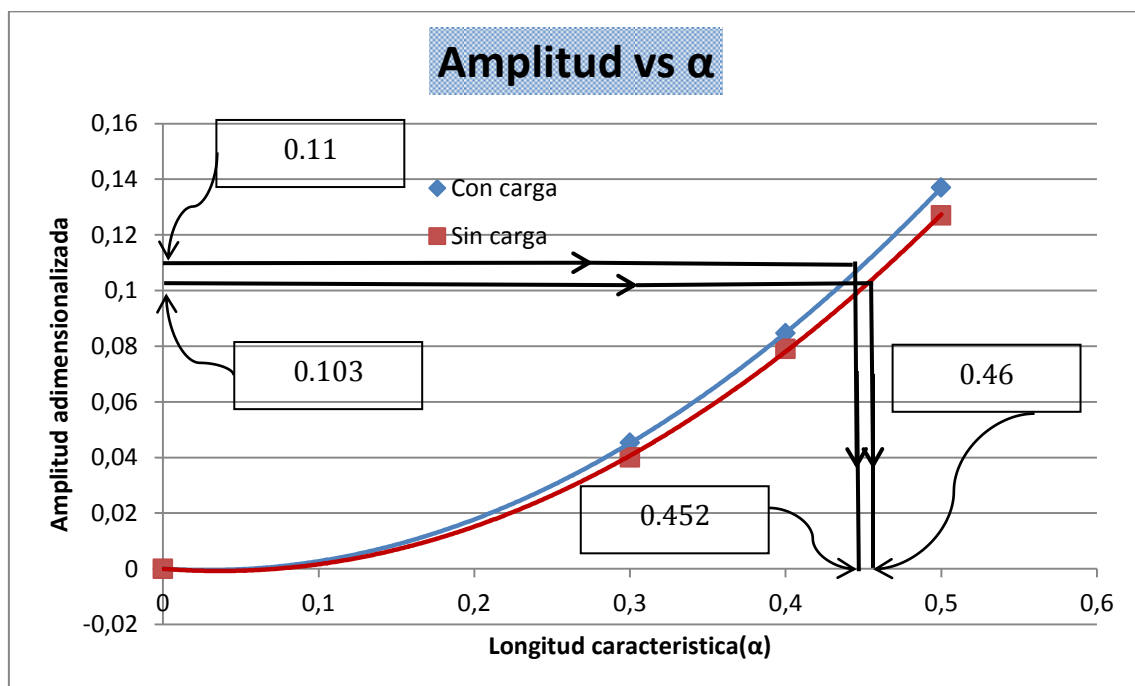
Obteniéndose, tras el ajuste de los datos obtenidos mediante polinomios de segundo grado, tanto para la viga solicitada como para la que no está solicitada:

$$\text{Área} = 1e^{-5}\alpha^2 - 1e^{-6}\alpha \quad (4.5)$$

Con factor de ajuste de la curva de:  $R^2 = 1$

Como se puede apreciar, la ecuación polinómica que ajusta los datos obtenidos para los dos estudios (viga con carga y sin carga) es distinta cuando se compara la amplitud con la longitud característica e igual cuando se comparan las áreas obtenidas con respecto a dicha longitud característica. Esto se debe, a que como ya se ha mencionado previamente el área es varios órdenes de magnitud menor que la amplitud, y varía en mucho menor medida que esta, por lo que aunque a simple vista en la figura 4.19 haya diferencias apreciables entre las curvas estudiadas, el ajuste realiza un redondeo que provocaría que aparentemente las curvas fueran similares.

Por otro lado, analizando cualquiera de las figuras presentadas más arriba (figura 4.18 y 4.19) se puede observar a simple vista, que para una misma longitud característica se obtiene diferentes valores de amplitudes o áreas encerradas cuando la viga esta solicitada que cuando no lo está, lo que podría conllevar a obtener para una misma fisura presente en el componente mecánico o estructural diferentes informaciones de la longitud característica de la misma cuando la viga está cargada respecto a cuándo no lo está. Se ideará este estudio con el ejemplo mostrado en la figura 4.20



**Figura 4.20:** Diferencias entre las longitudes características para una viga solicitada y otra sin solicitar.

En la figura 4.20 se aprecian las dos curvas que representan la amplitud con respecto a la longitud característica para una viga flectada y otra sin flectar. Si por ejemplo, se parte de unas señales cualesquiera obtenidas para una misma fisura perteneciente a un ensayo con la viga solicitada y en otro con la viga sin solicitar, las señales de tracción reflejadas proporcionarían dos amplitudes diferentes (una para cada ensayo). Aplicando el método inverso a ambos ensayos en la figura 4.20, se obtienen dos longitudes características de fisura diferentes para cada ensayo realizado. En concreto, para el ejemplo presentado en la figura 4.20, se registró en las ondas de tracción reflejadas correspondientes a una fisura de longitud característica  $\alpha = 0.45$  unas amplitudes adimensionalizadas de 0.11 (viga flectada) y 0.103 (viga sin flectar), a partir de las cuales, aplicando el método inverso en la figura 4.20, se obtuvieron unas longitudes características aproximadas de  $\alpha = 0.452$  y  $\alpha = 0.46$ , respectivamente. Es decir, aplicando una sollicitación previa a la sección fisurada el error aproximado que se obtiene es de aproximadamente un 0.44%, mientras que sin solicitar el error aumenta en un 2,2%.

Por tanto, tras observar los resultados obtenidos se puede concluir que someter un componente mecánico o estructural a una flexión previa de manera que los defectos presentes en el mismo sufran una ligera apertura, permite obtener una mayor precisión en la determinación de la profundidad de la fisura. No obstante, es importante resaltar que utilizar la curva perteneciente a la viga sin carga (indiferentemente de si se utilizan para determinar la longitud de la fisura datos de amplitudes o áreas de una viga cargada o sin cargar) dará como resultado profundidades de fisura mayores de lo que realmente son, obteniéndose, por tanto, una seguridad en la identificación del defecto. Por ello para aplicaciones en los que el componente en servicio tenga una alta responsabilidad, puede ser beneficioso emplear en el método no destructivo de localización de fisuras, las gráficas y expresiones polinómicas de las vigas sin solicitar, y así poder tener una detección de la fisura menos exacta, pero más segura (ya que se obtiene una profundidad de fisura mayor de lo que es) que cuando empleamos las gráficas y expresiones pertenecientes a la viga solicitada.



# 5

## Conclusiones y Trabajos futuros

---

*Como síntesis del proyecto, en el presente capítulo se establecen una serie de conclusiones que resuman los resultados obtenidos, y como estos han ido satisfaciendo los objetivos propuestos. Por otro lado, también se comentan algunas limitaciones relacionadas con el empleo del método, así como los posibles desarrollos del mismo en el futuro.*

## 5.1 Conclusiones

En el presente proyecto se ha analizado una técnica no destructiva capaz de detectar fisuras de frente recto en componentes unidimensionales mediante la propagación de las ondas longitudinales. De este modo, se ha realizado un análisis de las ondas longitudinales pudiendo establecer la relación existente entre las propiedades de las ondas que se propagan y las de la fisura, para posteriormente, mediante la resolución del problema inverso localizar y detectar cualquier fisura en los componentes mecánicos.

La resolución del problema directo ha permitido conocer las relaciones entre las propiedades características de la onda y las propiedades de la fisura, pudiendo determinar que la amplitud y el área encerrada bajo la curva, pertenecientes a la perturbación provocada por la fisura, aumentan conforme aumenta la longitud característica de la fisura  $\alpha$ , siendo la amplitud de la onda perturbada la que más se ve afectada por el aumento o disminución de la profundidad de la fisura.

Los resultados obtenidos mediante el problema inverso permiten demostrar la posible existencia de una nueva técnica capaz de detectar fisuras de frente recto. Para demostrar la fiabilidad del método se ha ilustrado la metodología mediante el ensayo de una viga de fisura desconocida, obteniendo tanto la posición de la fisura como longitud característica de la misma con apenas errores porcentuales del 1% y del 3.3%, respectivamente.

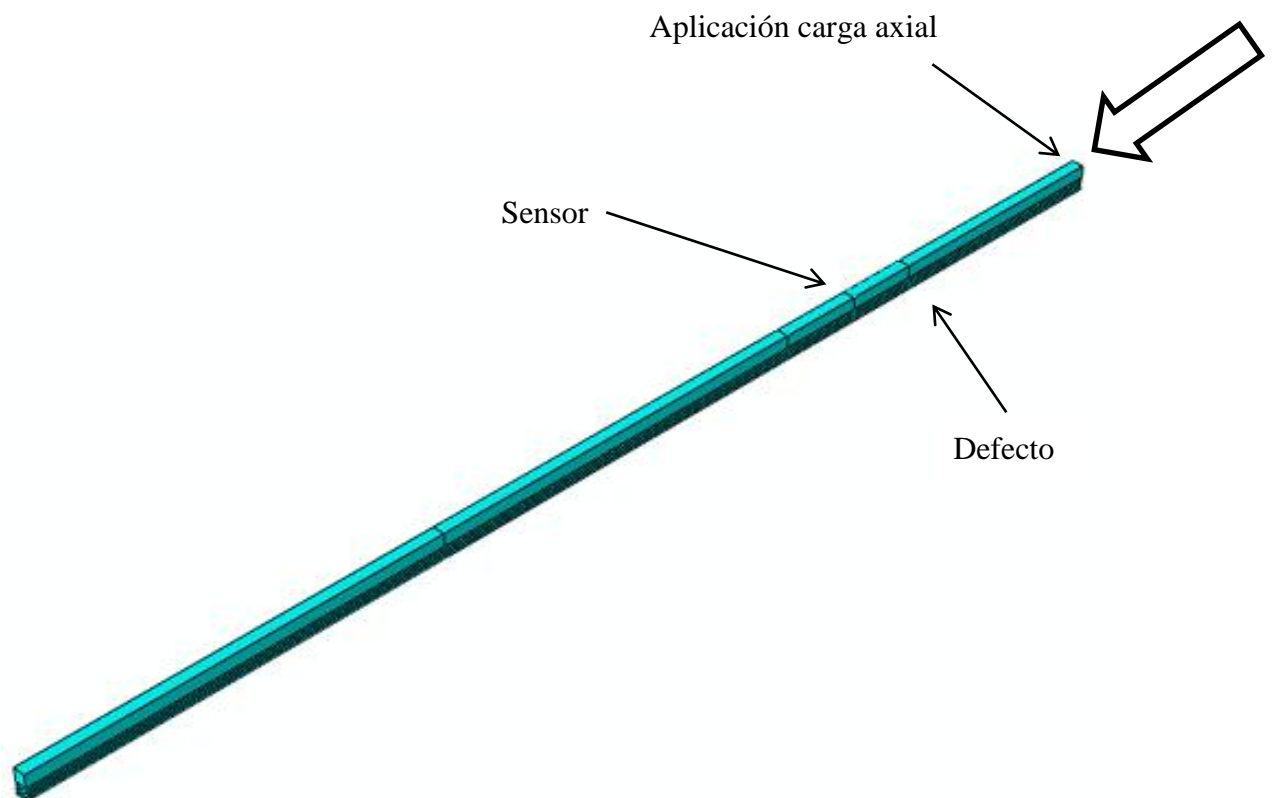
Finalmente, en la segunda parte del trabajo se ha demostrado la influencia de someter la viga a un estado de flexión pura, previo al análisis de la propagación, con el fin de abrir la sección fisurada. Los resultados obtenidos, arrojan que existe una relación entre la sollicitación exterior y las propiedades de la onda, pudiendo concluir que una sollicitación previa que provoque la apertura del defecto provoca un aumento en la amplitud y en el área encerrada de la onda perturbada por la fisura, lo que ocasiona la obtención de datos más precisos, pero también menos conservadores que cuando la viga se encuentra sin sollicitar.

Por tanto, como conclusión final se puede comentar que se ha conseguido analizar un método de simulación numérica, mediante la implementación de una aplicación informática, capaz de detectar fisuras en componentes mecánicos o estructurales de sección constante sin necesidad de conocer el comportamiento del componente intacto ni el material que lo conforma, a partir del estudio de las propiedades de las ondas reflejadas por la sección fisurada. Además, se ha llevado a cabo una demostración, mediante la cual se propone una herramienta básica de mejora consistente en emplear esta técnica no destructiva sometiendo al componente inspeccionado a unas sollicitaciones previas que provoquen la apertura de la fisura, con el fin de obtener unos resultados más exactos.

## 5.2 Limitaciones

Una vez establecidas las conclusiones alcanzadas tras la realización del proyecto es necesario describir un conjunto de limitaciones, o más bien recomendaciones de empleo, que se fueron obteniendo conforme se desarrollaba el método propuesto:

➤ En primer lugar, es importante resaltar, que este método on-line de detección de fisuras no es válido cuando la fisura se encuentra situada entre el punto de aplicación de la carga distribuida y el sensor.

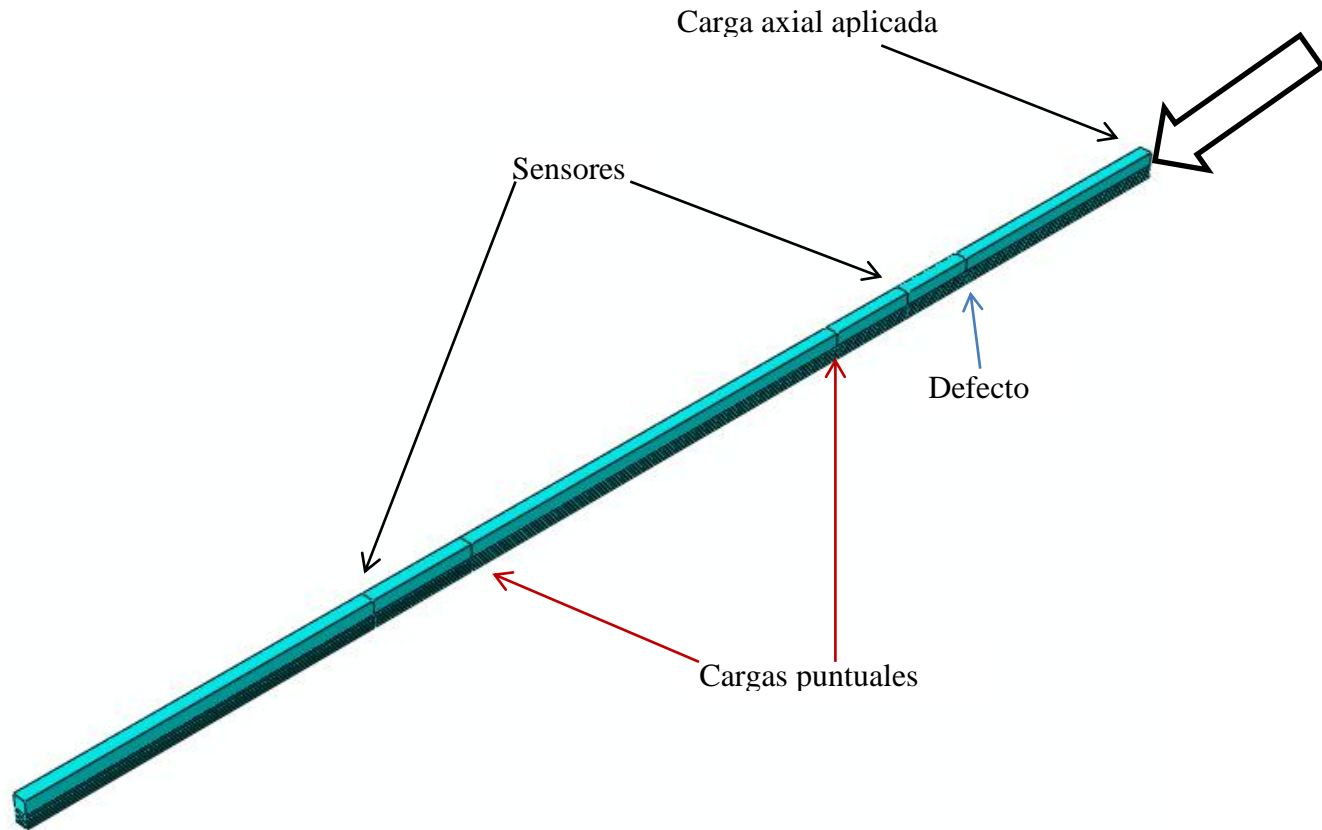


**Figura 5.1:** Fisura situada entre el punto aplicación presión y sensor.

Esto se debe, a que cuando la onda longitudinal llega a la fisura, la banda extensométrica aún no ha detectado nada. Parte de esta onda inicial de compresión retronará al punto de impacto como una pequeña onda de tracción, mientras que otra parte continuará su camino por la viga llegando al sensor, situado después de la fisura, que detectará una onda de compresión con una amplitud determinada sin notar que previo al registro de esa onda de compresión la viga presentaba alguna discontinuidad o defecto.

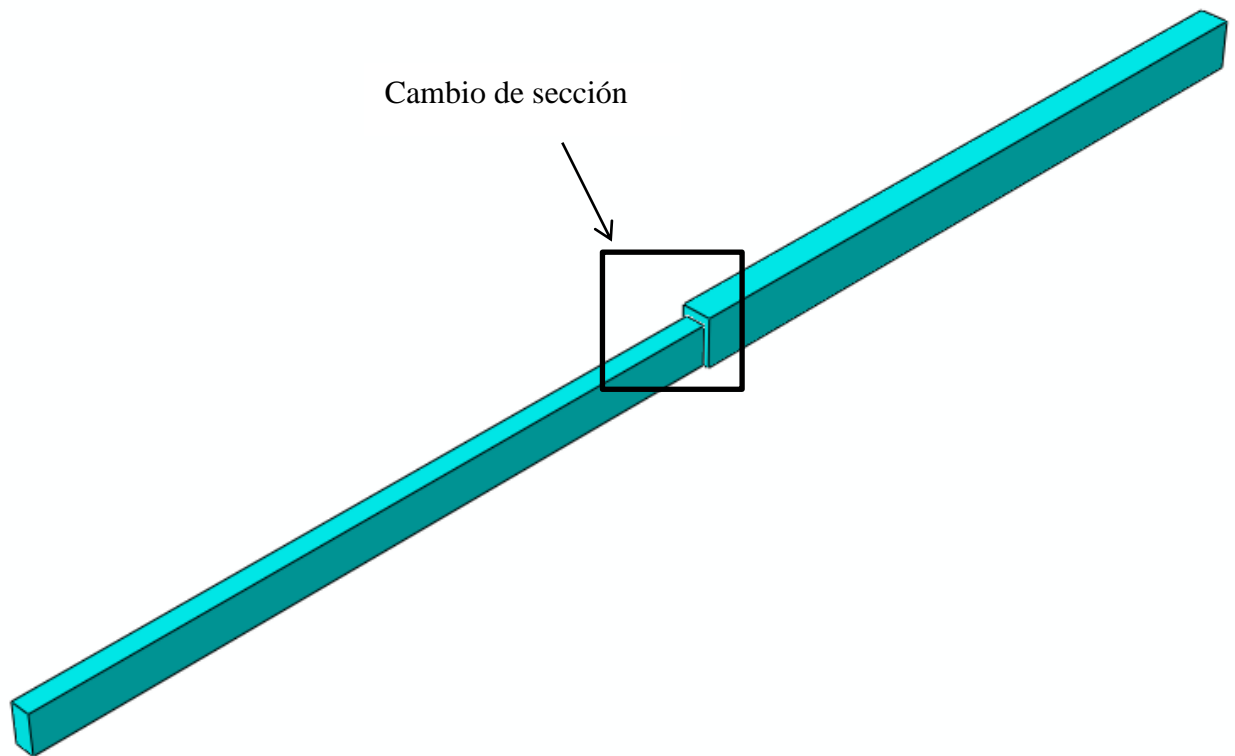
No obstante, esta deficiencia se puede resolver fácilmente colocando dos bandas extensométricas, una a cada lado de la viga y situadas a la misma distancia de sus

respectivos extremos libres. De esta manera independientemente del extremo en que se genere la onda, podremos detectar siempre la fisura en el interior de la viga.



**Figura 5.2:** Viga fisurada con doble sensor.

➤ Además, aunque el método presenta la ventaja de su posibilidad de empleo sin necesidad de conocer el material de la viga ni su comportamiento sin fisura, presenta el inconveniente de que no permite su empleo en vigas de sección variable, ya que la onda que se propaga a su paso por el cambio de sección se perturbará, regresando parte de la misma a la posición inicial como una pequeña onda de tracción. Se observa, que esto mismo es lo que sucede cuando la onda se encuentra con un defecto a su paso por la viga, por lo que la aplicación de este método en vigas con varias secciones podría dar lugar a errores al no saber con seguridad si el sensor detecta el cambio de sección, un defecto o posiblemente, al ser zonas de concentración de tensiones, ambos a la vez, es decir, que la fisura se encuentre exactamente en el cambio de sección.



*Figura 5.3: Viga de sección variable.*

## 5.3 Trabajos futuros

Finalmente, las líneas de investigación que se pueden realizar apoyándose en este trabajo se enumeran a continuación:

En primer lugar, resultaría interesante la realización de este proyecto mediante un análisis experimental que permita comparar los resultados obtenidos y validar conclusiones.

Otra línea de investigación estaría orientada hacia el empleo de someter a la viga a cargas mayores que las empleadas en este proyecto, con el fin de obtener con mayor claridad la diferencia existente entre las propiedades de las ondas con y sin solicitud previa.

Por otro lado, también se podría orientar este trabajo a la aplicación de la técnica en otro tipo de componentes de distintas geometrías pudiendo, de este modo, apreciar las diferencias existentes.

Finalmente, se propone desarrollar la metodología desarrollada en el presente informe para la detección, identificación y caracterización de fisuras internas.



# 6

## Gestión del proyecto

---

*Gestionar, organizar y controlar los recursos disponibles es fundamental para alcanzar los objetivos propuestos al inicio del proyecto. Por este motivo, se dedica este capítulo a describir y analizar el conjunto de etapas y actividades necesarias para garantizar el cumplimiento de los objetivos en el plazo establecido.*

*Así mismo, en este capítulo también se realiza un presupuesto general del proyecto teniendo en cuenta diversos factores que se desglosarán para la mejor estimación del coste económico total.*

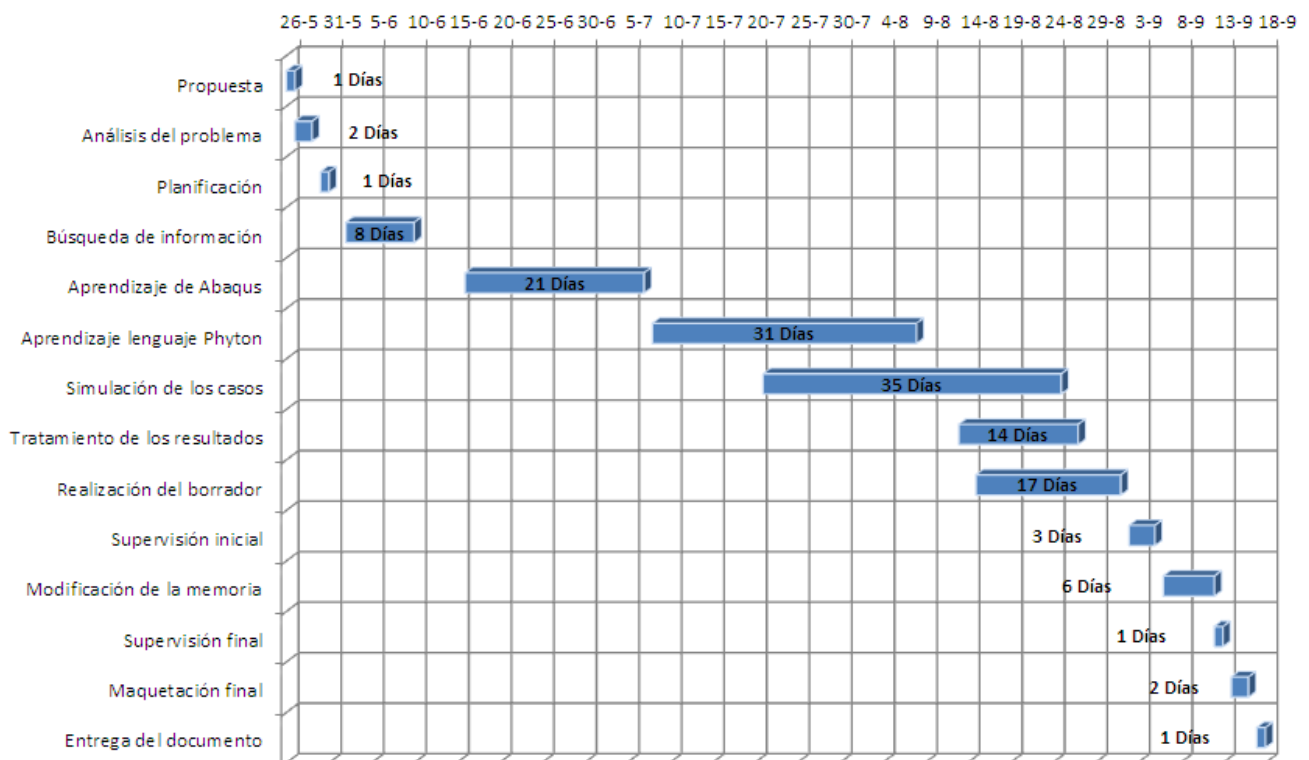
## 6.1 Planificación del proyecto

El proceso de planificación se realiza para obtener una idea aproximada del tiempo empleado en la realización de cada una de las actividades en particular, y por tanto del tiempo total del proyecto. Para llevar a cabo los objetivos del proyecto se han realizado dos planificaciones diferentes, una de ellas al comienzo del proyecto y con miras a ser meramente orientativa; y otra realizada al final del mismo y ya con los datos reales utilizados para la realización del mismo.

Ambas planificaciones se realizaron acudiendo a una herramienta gráfica muy sencilla e intuitiva y, por tanto, altamente empleada en la gestión de proyectos, el diagrama de Gantt.

### 6.1.1 Planificación inicial

Esta planificación fue realizada a finales del mes de abril, con el objetivo de orientar acerca de la realización de las actividades que componen el proyecto. El diagrama de Gantt con la planificación inicial tiene la forma que se presenta en la figura 6.1.



**Figura 6.1:** Planificación inicial. Diagrama de Gantt

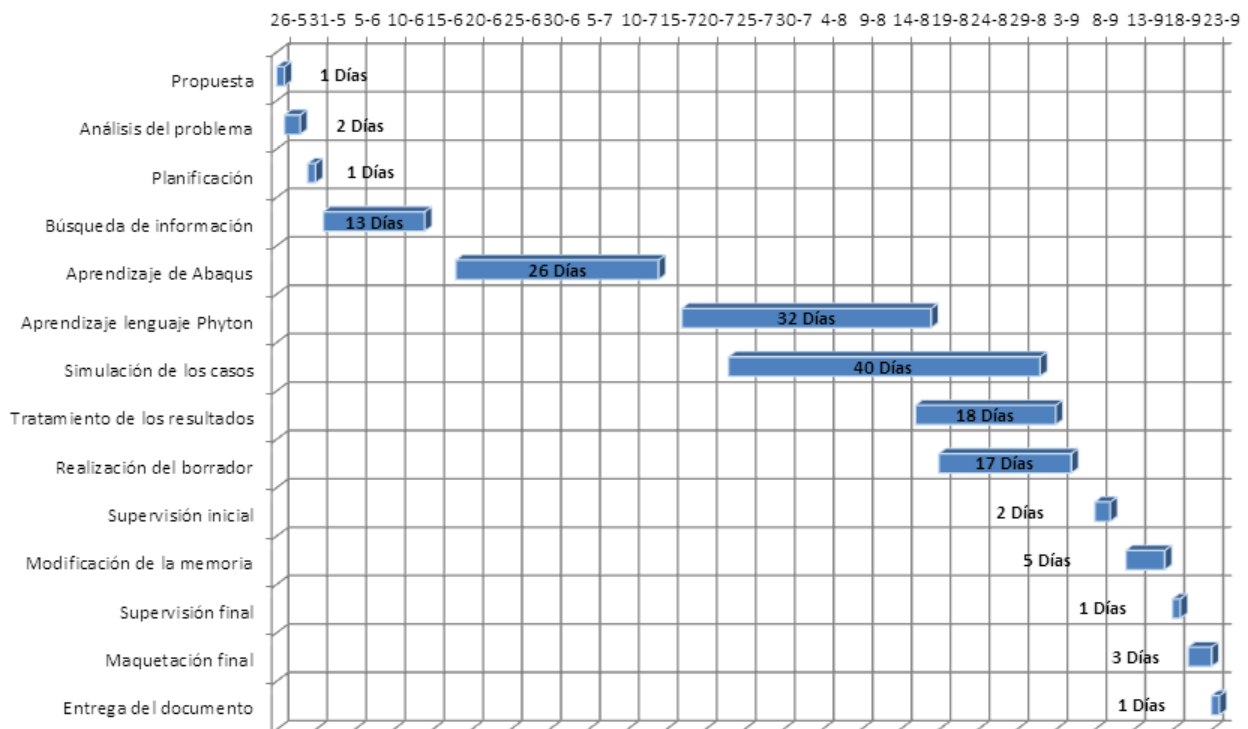
En el diagrama de Gantt de la figura 6.1 estima que la duración del proyecto es de 115 días. No obstante, se puede observar que aunque cada una de las tareas del proyecto se planificaron con una protección suficiente para que los plazos se



cumplieran( muchas de esas actividades fueron programadas estimándolas con un mayor plazo del necesario para su realización), como ocurre con casi todos los proyectos con múltiples tareas, la aparición de diversos fenómenos como el síndrome del estudiante o la primera ley de Parkinson (el trabajo ocupa absolutamente todo el tiempo disponible) provocaron que se alargase la finalización del proyecto más de lo necesario [17].

## 6.1.2 Planificación final

En la planificación final se muestran los recursos temporales reales empleados en la realización del proyecto, y por tanto, será a partir de esta planificación sobre la que se realice el presupuesto económico en el la siguiente sección. El diagrama de Gantt que representa el tiempo real de duración del proyecto es el representado en la figura 6.2.



**Figura 6.2:** Planificación final. Diagrama de Gantt

Por tanto la duración del proyecto, teniendo en cuenta todos los retrasos, es de 121 días, siendo la fecha de comienzo del mismo el 26 de mayo y la de fin el 23 de septiembre.

Comparando los diagramas de ambas planificaciones podemos observar que la duración se ha incrementado en 6 días con respecto a la fecha inicialmente prevista. El retraso con respecto a la planificación prevista inicialmente se encuentra principalmente en tres actividades. Las causas del retraso en dichas actividades se enumeran a continuación:

➤ **Búsqueda de información:** Elaborar un ensayo no destructivo innovador tiene numerosas consecuencias, así como dificultades. Una de las más llamativas reside en la escasa información que existe del mismo, lo que se traduce en una larga búsqueda de información, acción que provoca un inesperado retraso en la realización del proyecto

➤ **Aprendizaje del programa:** El hecho de haber utilizado una herramienta tan empleada en la universidad era un síntoma claro de que no sería necesario recurrir a ningún manual para su correcta utilización, no obstante, como se ha especificado en el capítulo 2 la herramienta informática Abaqus cuenta con multitud de opciones para realizar el análisis, que nunca se llegaron a prevenir.

➤ **Simulación de los casos.** El último gran retraso apreciable en la planificación de la figura 6.2 se produjo en la tarea de simulación ya que las capacidades del ordenador empleado eran insuficientes para la gran cantidad de recursos que utilizaba el programa Abaqus. No obstante este retraso es menos notable que los anteriores, puesto que la simulación/implementación de los casos permitía la realización de otras tareas en paralelo.

En la tabla 6.1 se muestra un desglose más detallado de las distintas actividades que componen este proyecto, describiéndose las fechas de comienzo y fin de cada una de ellas, así como las horas dedicadas a cada una de ellas.

Nombre de la actividad	Fecha de comienzo	Fecha de finalización	Horas dedicadas
Propuesta	26/05/2014	26/05/2014	2
Análisis del problema	27/05/2014	29/05/2014	5
Planificación	30/05/2014	30/05/2014	5
Búsqueda de información	01/06/2014	14/06/2014	40
Aprendizaje de Abaqus	18/06/2014	14/07/2014	60
Aprendizaje lenguaje Phytón	17/07/2014	18/08/2014	110
Simulación de los casos	23/07/2014	01/09/2014	205
Tratamiento de los resultados	16/08/2014	03/09/2014	40
Realización del borrador	19/08/2014	05/09/2014	65
Supervisión inicial	08/09/2014	10/09/2014	8

Modificación de la memoria	12/09/2014	18/09/2014	15
Supervisión final	19/09/2014	19/09/2014	2
Maquetación final	20/09/2014	23/09/2014	10
Entrega del documento	23/09/2014	23/09/2014	1
<b>Horas totales</b>			<b>571</b>

*Tabla 6.1: Planificación final detallada.*

Por lo tanto, a la vista de la tabla 6.1 se puede concluir que se han dedicado para la realización del proyecto 571 horas, siendo 205 de las mismas correspondientes a la simulación de los casos por el ordenador, y las 365 restantes correspondientes al esfuerzo empleado.

## 6.2 Presupuesto

Una vez desarrollada la planificación del proyecto se van a presentar los costes asociados al desarrollo del proyecto, especificando entre el gasto de personal, el gasto de materiales empleados, así como de otros gastos que no se incluyen en ninguna de las categorías anteriores.

### 6.2.1 Coste del personal

El coste asociado al personal es el coste de las horas empleadas en la realización del proyecto por parte de los trabajadores que lo elaboran. Dentro de este concepto se distingue entre los costes asociados a la realización del proyecto por parte del alumno, y los asociados a la supervisión del mismo por parte de la tutora.

Costes totales del personal				
Personal	Tarea	Tiempo empleado	Coste horario (€/h)	Coste total (€)
Ingeniero Senior	Supervisión del proyecto	30	60	1800
Ingeniero graduado	Elaboración del proyecto	365	20	7300
			<b>Total</b>	<b>9100</b>

**Tabla 6.2:** costes asociados al personal

Por tanto, el coste asociado al personal asciende a 9100 euros

## 6.2.2 Costes de material

Los costes de los materiales utilizados incluyen tanto a los consumibles de ofimática (ratón, pantalla, etc...), como a las aplicaciones empleadas para la realización del presente proyecto, es decir, programas cuyo empleo requiere de una licencia. Los costes asociados a los materiales se pueden apreciar desglosados en la tabla siguiente:

Coste de material			
Producto	Unidades	Precio/unidad(€/unidad)	Coste total (€)
Licencia del software Abaqus 6.11	1	13500	13500
Consumibles de ofimática	1	50	50
		Total	13550

**Tabla 6.3:** Coste de los materiales empleados en el proyecto

En total, el gasto asociado al empleo de materiales asciende a 13550 euros

## 6.2.3 Costes indirectos

Los costes indirectos engloban todos aquellos costes que no estén incluidos en ninguno de los conceptos anteriores, como por ejemplo el gasto de electricidad. Puesto que estos costos son muy complicados de calcular se realiza una aproximación suponiendo que estos costes indirectos suponen alrededor del 5% del coste total del proyecto.

## 6.2.4 Coste total del proyecto

Finalmente, en esta sección se muestra el coste total del proyecto sumando los costes ocasionados por el personal, por los equipos empleados y por los costes indirectos

PRESUPUESTO DEL PROYECTO	
Concepto	Coste total (€)
Coste de personal	9100
Coste de material	13550
Subtotal	22650
Costes indirectos	1132.5
<b>Total</b>	<b>23782.5 euros</b>

*Tabla 6.4: Coste total del proyecto.*

Finalmente el presupuesto total del proyecto asciende a 23782.5 euros.



## 7. Bibliografía

- [1] L Rubio, B Muñoz-Abella, G-Loaiza. Estudio de la propagación de ondas en ejes fisurados, Congreso Iberoam de Ingeniería Mecánica. Las Palmas, España (2009)
- [2] L Rubio, B Muñoz-Abella, G-Loaiza. Numerical simulation of wave propagation in cracked shafts, Conference of dynamic behaviour of materials, DYMAT, Bruselas, Bélgica (2009)
- [3] L Rubio, B Muñoz-Abella. Análisis de las señales de propagación de ondas en ejes fisurados, Congreso nacional de ingeniería mecánica, Ciudad Real, España (2010)
- [4] Ruiz Ayuso, María. Estudio del comportamiento a flexión en ejes con fisuras de frente semielíptico. Proyecto fin de carrera. Leganés, 2010
- [5] Úbeda-Portugués Soriano, Rubén Benito. Estudio de la propagación de ondas en ejes fisurados con fisura elíptica. Proyecto fin de carrera. Leganés, 2009
- [6] Rodríguez González, Cristina. Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos. Tesis Doctoral. Santander, 2012
- [7] Rodríguez Rodríguez, Víctor. Análisis del comportamiento estático de ejes con fisuras de frente elíptico. Proyecto fin de carrera. Leganés, 2009
- [8] Fuentes Calles, Laura. El método de elementos finitos aplicado al cálculo de pequeñas estructuras. Pre y postprocesado. Salamanca, 2011
- [9] M. Puri, Gautam. Phyton Scripts for Abaqus. Primera Edición 2011
- [10] M. Alonso, E.J. Finn. Física. *Movimiento ondulatorio* Pág. 633-655
- [11] Samuel.K Clarck. Dinámica de elementos continuos. *Movimiento longitudinal de las varillas*. Pág. 57-59.
- [12] Ortega Giron, Manuel. Lecciones de física. *Ondas progresivas*. Pág. 1079-1115 Departamento de Física aplicada. Universidad de Córdoba.
- [13] Jiménez Rodríguez, Juan Manuel. Análisis de la respuesta dinámica al impacto de aros cónicos deformables. Tesis doctoral. Diciembre de 2008
- [14] Simulia. Abaqus/Cae User's Manual 6.11-2 (año 2011)
- [15] Rubio Herrero, Patricia. Factor DE Intensidad de tensiones en fisuras elípticas con mecanismos de apertura y cierre en ejes giratorios. Tesis doctoral. Leganés, 2014

[16] Domínguez Quintas, Miguel Estudio numérico del comportamiento de una fisura de frente recto contenido en un eje giratorio. Proyecto fin de carrera. Leganés, 2012.

[17] Antón Riquelme, Francisco Rivera. Apuntes de la asignatura Oficina Técnica. (Departamento de Ingeniería de la Organización, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés)

[18] Introducción los ensayos no destructivos.  
[http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sistendca.com%2FDOCUMENTOS%2FManual%2520Introduccion%2520a%2520los%2520END.pdf&ei=110aVLmFOYLLalf7gMAN&usg=AFQjCNG\\_vZZ7T2Q\\_u8rIfSi24yECwelrAA&bvm=bv.75097201,d.d2s](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sistendca.com%2FDOCUMENTOS%2FManual%2520Introduccion%2520a%2520los%2520END.pdf&ei=110aVLmFOYLLalf7gMAN&usg=AFQjCNG_vZZ7T2Q_u8rIfSi24yECwelrAA&bvm=bv.75097201,d.d2s)

[19] Ondas longitudinales.  
<http://www.ehu.es/acustica/espanol/basico/onloes/onloes.html>. Copyright 2003. Última visita (15 Septiembre 2014)

[20] Ondas longitudinales en una barra elástica.  
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/barra/barra.htm>. Última visita (12 de Septiembre de 2014)

[21] Principia Ingenieros Consultores S.A. [www.principia.es](http://www.principia.es) última actualización (14 de Septiembre de 2014)

[22] Apuntes de la asignatura Elasticidad y resistencia de materiales. (Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés)

[23] Ensayos no destructivos. Universidad Tecnológica de Pereira.  
<http://blog.utp.edu.co/metalografia/2010/11/05/ensayos-no-destructivos/> Publicado el 5 de noviembre de 2010.